

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»



РАСЧЕТЫ ВЕНТИЛЯТОРНЫХ ГРАДИРЕН

Методические указания для курсового и дипломного
проектирования
для студентов специальности 144 «Теплоэнергетика»
всех форм обучения

Харьков 2016

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

РАСЧЕТЫ ВЕНТИЛЯТОРНЫХ ГРАДИЕН

Методические указания для курсового и дипломного
проектирования
для студентов специальности 144 «Теплоэнергетика»
всех форм обучения

Утверждено
редакционно-издательским
советом университета,
протокол № 2 от 23.06.2016

Харьков
НТУ «ХПИ»
2016

Розрахунки вентиляторних градирень: методичні вказівки для курсового та дипломного проектування для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» усіх форм навчання / Уклад. О.Р. Пересьолков, О.В. Круглякова. – Харків: НТУ "ХПІ", 2016. – 56 с.

Укладачі: О.Р. Пересьолков
 О.В.Круглякова

Рецензент С.В.Угольніков

Кафедра теплотехніки та енергоефективних технологій

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $C_{pж}$ – удельная массовая изобарная теплоемкость воды, Дж/(кг К)
 $F_{ор}$ – площадь орошения градирни, м²
 $G_{в}$ – подача воздуха вентилятором, кг/ч (кг/с)
 $G_{с.в.}$ – расход сухого воздуха, кг сух.в-ха/с
 $G_{и}$ – количество испарившейся воды, кг/ч (кг/с)
 $h_{ор}$ – высота оросителя, м
 I – удельная энтальпия (теплосодержание) воздуха, кДж/(кг сух. в-ха)
 I_1, I_2 – удельные энтальпии воздуха в ядре потока при входе в ороситель градирни и выходе из него, кДж/(кг сух.в-ха)
 I'' – удельная энтальпия насыщенного воздуха, кДж/(кг сух.в-ха)
 I''_1, I''_2 – удельные энтальпии насыщенного воздуха у поверхности воды на входе в ороситель градирни и выходе из него, кДж/(кг сух.в-ха)
 $\Delta I_{ср}$ – средняя логарифмическая разность удельных энтальпий воздуха, кДж/кг сух.в-ха
 P_6 – барометрическое давление, мм рт. ст.
 $g_{ж}$ – плотность орошения градирни, м³/(м²ч) [кг/(м²с)]
 r – удельная теплота парообразования, кДж/кг
 $t_{ж1}, t_{ж2}$ – температуры воды на входе в ороситель градирни и выходе из него, °С
 d_1, d_2 – влагосодержание влажного воздуха на входе в ороситель градирни и выходе из него, г/кг сух.в-ха
 $\beta_{хв}$ – объемный коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности влагосодержаний, кг/(м³·с·кг/кг сух.в-ха)
 A – эмпирический коэффициент, характеризующий влияние конструктивных особенностей оросителя на его охлаждающую способность, м⁻¹
 m – показатель степени, характеризующий зависимость объемного коэффициента массоотдачи от изменения массовой скорости воздуха в оросителе
 $\lambda = G_{в}/G_{ж}$ – отношение массового расхода воздуха к расходу воды, кг/кг
 θ, τ – температуры атмосферного воздуха по сухому и смоченному термометрам, °С
 ϕ – относительная влажность воздуха, %
 $V_{ор}$ – объем оросителя градирни, м³
 $h_{ор}$ – высота оросителя градирни, м
 $\zeta_{ор}$ – коэффициент аэродинамического сопротивления сухого оросителя
 $K_{ор}$ – коэффициент пропорциональности, учитывающий влияние плотности орошения на аэродинамическое сопротивление оросителя

ВСТУПЛЕНИЕ

Вода в промышленности и энергетике широко используется для охлаждения самых разнообразных веществ и узлов установок (например, для конденсации и охлаждения газообразных и жидких продуктов химических и нефтехимических производств, для конденсации отработавшего пара после расширения его в паровых двигателях, для отвода теплоты от масла в маслоохладителях охлаждения сжатого воздуха и для охлаждения другого оборудования в целях предохранения его от разрушения под влиянием высоких температур (например, цилиндров компрессоров, кладки производственных печей) и т.д.). Существуют две основные схемы производственного водоснабжения: *прямоточное* (с однократным использованием воды, например, из рек и сливом теплой воды обратно в реку) и *оборотное*.

Оборотное водоснабжение – это такая система водоснабжения, которая обеспечивает многократный оборот одной и той же охлаждающей воды в технологическом процессе. Применение оборотного водоснабжения вместо прямоточного позволяет существенно уменьшить расход природной воды и тепловое загрязнение окружающей среды. Этот вид водоснабжения наиболее часто применяется в системах охлаждения промышленных предприятий и тепловых станций, которые являются крупнейшими потребителями охлаждающей воды для технологических целей.

Так как в процессе охлаждения оборудования вода, отбирая теплоту, сама нагревается, для последующего использования ее, в свою очередь, необходимо охладить. Для снижения температуры охлаждающей воды при оборотной схеме водоснабжения применяются пруды-охладители, брызгальные бассейны, градирни. В условиях растущей концентрации промышленных производств применение градирен – это практически единственный перспективный метод рассеивания низкопотенциальной тепловой энергии в атмосферу.

Градирня – это контактный теплообменный аппарат для охлаждения большого количества воды направленным потоком атмосферного воздуха.

Основной принцип функционирования градирен состоит в испарении

определенного количества воды при ее контакте с воздухом (испарительное охлаждение). Чем больше поверхность контакта воды с воздухом, тем более благоприятны условия теплоотдачи. При испарении температура воды снижается.

Из всех существующих типов градирен, классифицируемых по способу подвода воздуха к воде (башенные, атмосферные, эжекционные, вентиляторные) **вентиляторные градирни** нашли самое широкое применение благодаря своей компактности (по сравнению с башенными градирнями), более глубокому охлаждению воды, чем у других типов градирен, меньшей зависимости степени охлаждения от параметров наружного воздуха, возможности регулировки охлаждающей способности.

Вентиляторные градирни применяются на промышленных предприятиях с относительно небольшими расходами воды систем оборотного водоснабжения в случаях, когда площадь для размещения охлаждающих установок недостаточна или возникает необходимость более глубокого охлаждения воды.

Вентиляторные градирни также принято классифицировать по расположению вентиляторов и по способу образования поверхности контакта воды и воздуха.

По расположению вентиляторов различают градирни с нагнетанием ((рис. 1 а) и с созданием разрежения (т.е. вытяжные) (рис. 1 б). В градирнях с нагнетанием вентиляторы располагаются снизу, а в градирнях с разрежением – сверху. Вентиляторные градирни строят одно- и многосекционными, размещая в каждой секции свой вентилятор. Многосекционные градирни могут состоять из нескольких (до 10 и более) секций. Количество секций многосекционной градирни должно быть не менее двух, чтобы обеспечить охлаждение воды в летнее время при аварийной ситуации в одной из секций. Основные показатели градирен приведены в табл. П 2 ÷ П 3.

По способу образования поверхности контакта воздуха и воды вентиляторные градирни подразделяются на пленочные, капельные и комбинированные. В пленочных градирнях вода стекает в виде тонкой пленки по специальным пластинам. В капельных градирнях поток воды, подаваясь сверху, разбивается на капли с помощью специальных розеток или полок. Устройство для организации пленок и капель в градирнях называется оросителем. Соответственно, он может быть пленочным, капельным или комбинированным.

Вентиляторные градирни характеризуются следующими основными величинами: объемным или массовым расходом охлаждаемой воды $V_{\text{ж}}$, м³/ч или $G_{\text{ж}}$, кг/ч (гидравлическая нагрузка); тепловой нагрузкой Q , кВт; плотностью орошения (объемным или массовым расходом воды, приходящимся на 1 м² площади оросителя в плане) $g_{\text{ж}}$, м³/(м²·ч) или кг/(м²·с); степенью охлаждения воды или зоной охлаждения δt , К.

В зависимости от типа оросителя рекомендуются такие плотности орошения: для пленочного – $g_{\text{ж}} = 8 \div 12$ м³/(м²·ч); для капельного – $g_{\text{ж}} = 6 \div 8$ м³/(м²·ч) [3, стр. 8; 7, стр. 227].

Удельная тепловая нагрузка, приходящаяся на 1 м² площади оросителя в плане для вентиляторных градирен рекомендуется в пределах $q = 90 \div 120$ Вт/м² [7, стр. 227].

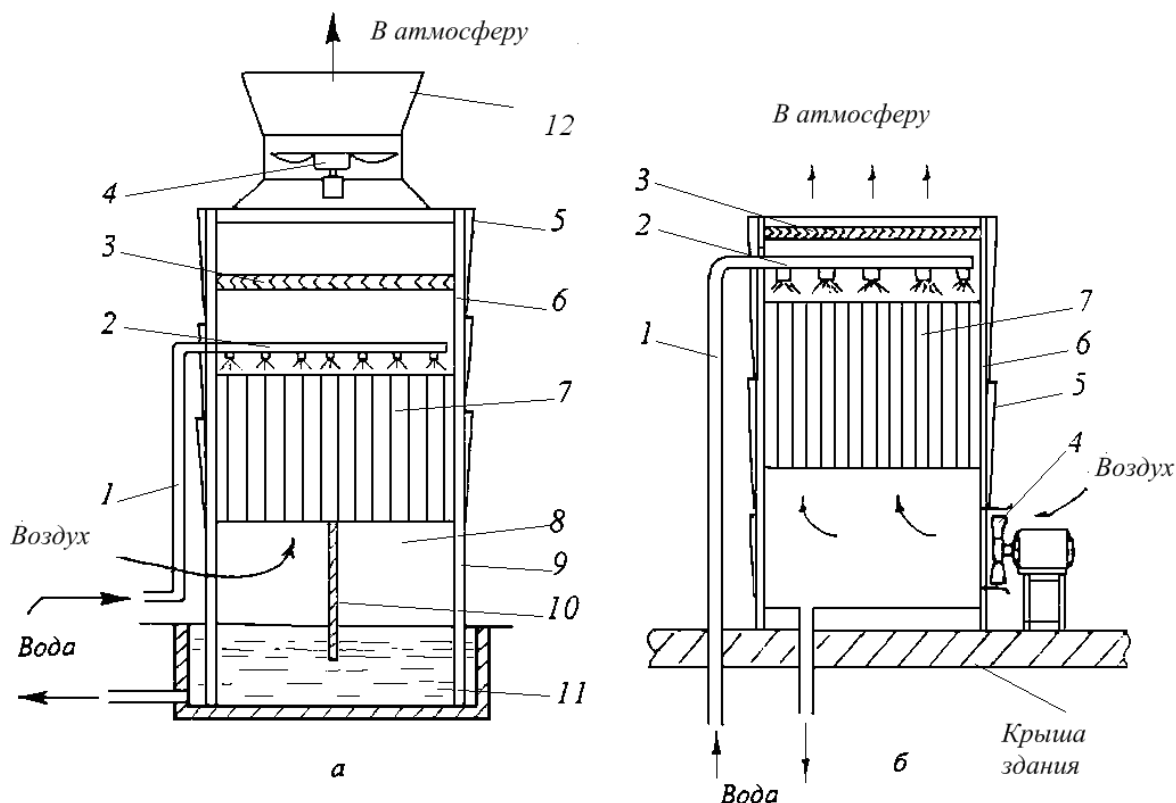
Техническая вода, поступающая для охлаждения на вентиляторную градирню, должна иметь температуру на входе не выше 55 °С и содержать не более 100 мг/л механических примесей [7, стр. 227].

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ ГРАДИРНИ

Упрощенно схемы одновентиляторной градирни с вытяжным и нагнетательным вентилятором представлены на рис. 1.

Рассмотрим принцип действия вентиляторной градирни с вытяжным вентилятором. Нагретая в технологическом процессе вода по магистральным трубопроводам поступает к градирне. Далее она по подводящей трубе 1 поднимается к водораспределительной системе 2, состоящей из коллектора и распределительных труб, на которых закреплены форсунки. Через форсунки вода распыляется на ороситель 7 и стекает по его поверхности. Через входные окна 9 вентилятор 4 всасывает атмосферный воздух, который поднимается вверх по каналам в оросителе и охлаждает воду, стекающую по поверхности оросителя. Охлажденная вода стекает в бассейн 11, а теплый воздух через диффузор вентилятором выводится в атмосферу со скоростью 5–7 м/с. Поток поднимается до 25 м в высоту, таким образом, исключается рециркуляция (вторичное попадание) теплого влажного воздуха во входные окна градирни. Диффузор предназначен для улучшения аэродинамических характеристик воздушного потока на выходе из градирни и защиты лопастей вентилятора градирни от внешних физических воздействий. Поднимающийся воздух уносит с собой мелкие капли влаги. Для того, чтобы снизить потери оборотной воды, в верхней части градирни устанавливается каплеуловитель

3. В градирне с нагнетательным вентилятором скорость выхода воздуха из градирни $1\div 2$ м/с, поэтому для снижения вероятности рециркуляции такие градирни устанавливаются на крыше зданий.



а – градирня с вентилятором, создающим разрежение;

б – градирня с нагнетательным вентилятором

Рисунок 1 – Схема вентиляторных градирен:

1 – подводящий трубопровод; 2 – водораспределительная система; 3 – каплеуловитель, 4 – вентилятор; 5 – обшивка; 6 – корпус градирни; 7 – ороситель; 8 – воздухораспределительное пространство; 9 – воздухоходные окна; 10 – ветровая перегородка; 11 – бассейн; 12 – диффузор

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ГРАДИРЕН

Оросители

Ороситель является основным технологическим элементом градирни, определяющим ее охлаждающую способность и аэродинамическое сопротивление. Для получения достаточной охлаждающей способности необходимо создать соответствующую площадь поверхности контакта пленки воды с воздухом.

Однако эта поверхность не должна слишком загромождать площадь сечения градирни, иначе это вызовет избыточное аэродинамическое сопротивление этого участка, следовательно, дополнительную нагрузку на вентилятор.

Оросители проектируются *капельными, пленочными* или *комбинированными*.

Ороситель также может быть *поперечноточным*, если воздух проходит через него горизонтально – поперек стекающих вниз пленок или падающих капель воды, и *противоточным*, если воздух движется в нем вверх – навстречу стекающей воде.

Капельный ороситель состоит из большого числа реек треугольного или прямоугольного сечения, расположенных горизонтальными ярусами. При падении капель воды с верхних реек на нижние образуются мелкие брызги, создающие поверхность соприкосновения с воздухом.

Пленочный ороситель состоит из щитов, устанавливаемых вертикально или под небольшим углом к вертикали. По поверхности щитов стекает вода, образуя пленку толщиной $0,3 \div 0,5$ мм.

Также оросители проектируют *комбинированными* *капельно-пленочными*.

Пленочный ороситель предпочтительнее капельного, так как он оказывает меньшее сопротивление движению воздуха, однако для его изготовления требуется больший расход материалов.

Материал пленочных оросителей должен быть хорошо смачиваемым. Ранее в качестве материала для оросителей широко использовалось дерево, пропитанное специальным антисептиком. Однако постоянный контакт с текущей теплой хлорированной водой и влажным воздухом приводит к быстрому износу деревянных конструкций оросителей, поэтому срок их службы невелик и требуются частые ремонты.

Асбоцементные оросители (рис. 2 и табл. П.4) изготавливаются из стандартных плоских или волнистых листов. Асбоцемент, как и дерево, хорошо смачивается водой, он гигроскопичен, впитывает в себя воду в количестве до 12 % собственной массы. Благодаря этим качествам по его листам обеспечивается хорошее растекание пленки воды, что улучшает охлаждающий эффект оросителя. Однако асбоцементные оросители имеют сравнительно большую массу на единицу площади.

В настоящее время наиболее распространены *оросители из пластмасс*

(рис. 3, табл. П.5). Пластмасса противостоит химическому воздействию многих растворов, кислот, щелочей и солей, что выгодно отличает ее от древесины. Для изготовления пластмассовых оросителей используют поливинилхлорид, полиэтилен низкого давления, ударопрочный полистирол и другие материалы, для которых в целом характерна гладкая гидрофобная поверхность, поэтому новые, они имеют плохую смачиваемость.

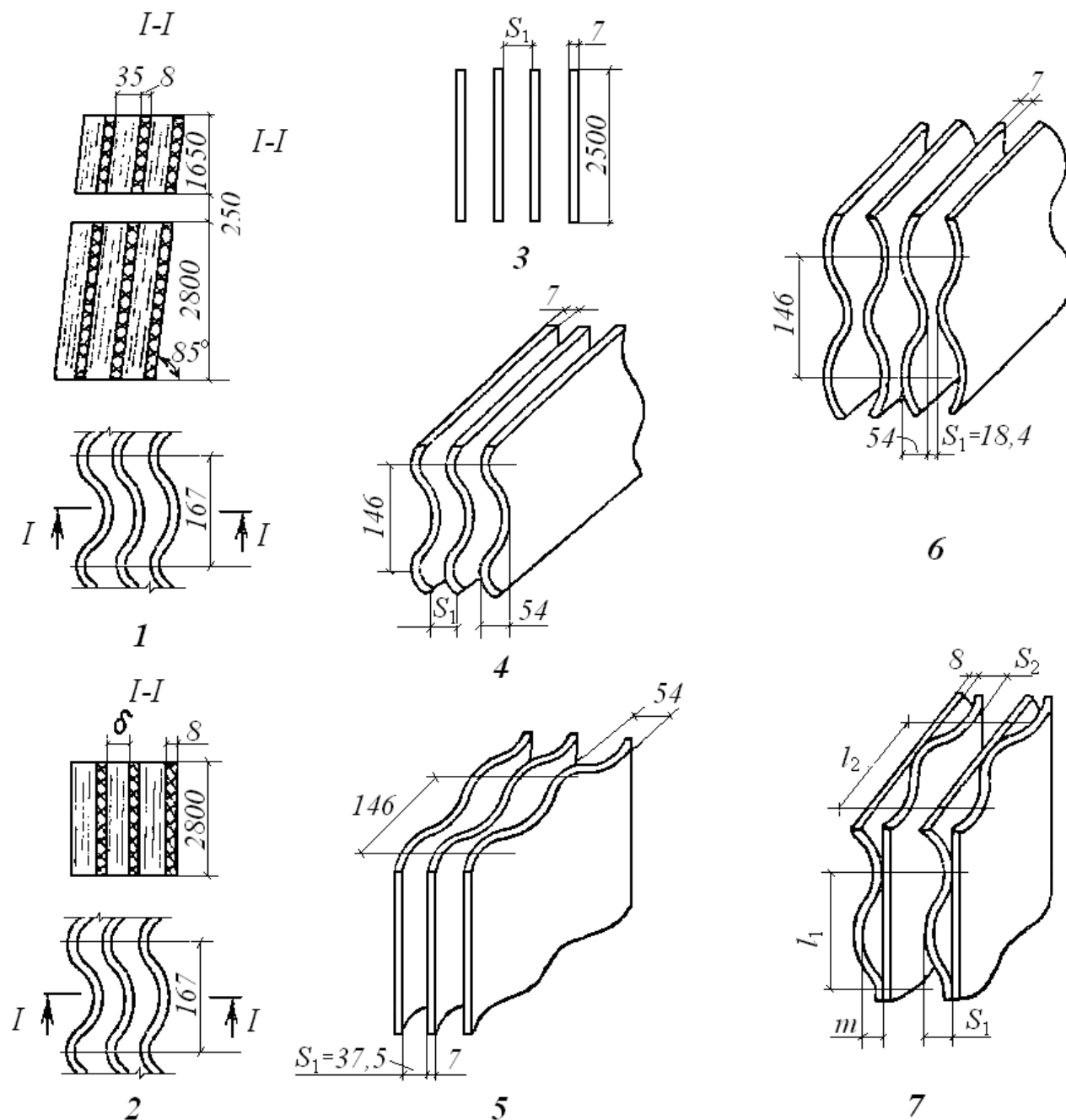


Рисунок 2 – Оросители из асбоцементных листов

Для улучшения характеристик пластмассовых оросителей их

поверхность выполняется шероховатой, пористой или волнистой, подбирается оптимальное число и форма волн, листы перфорируются или заменяются сетками, а также устраиваются разрывы по ходу движения воды и воздуха, обеспечивающие чередование капельных и пленочных режимов движения воды и за счет этого – перераспределение и дополнительную турбулизацию взаимодействующих потоков и повышение интенсивности теплообмена.

Аналогичные характеристики других оросителей приведены в [2].

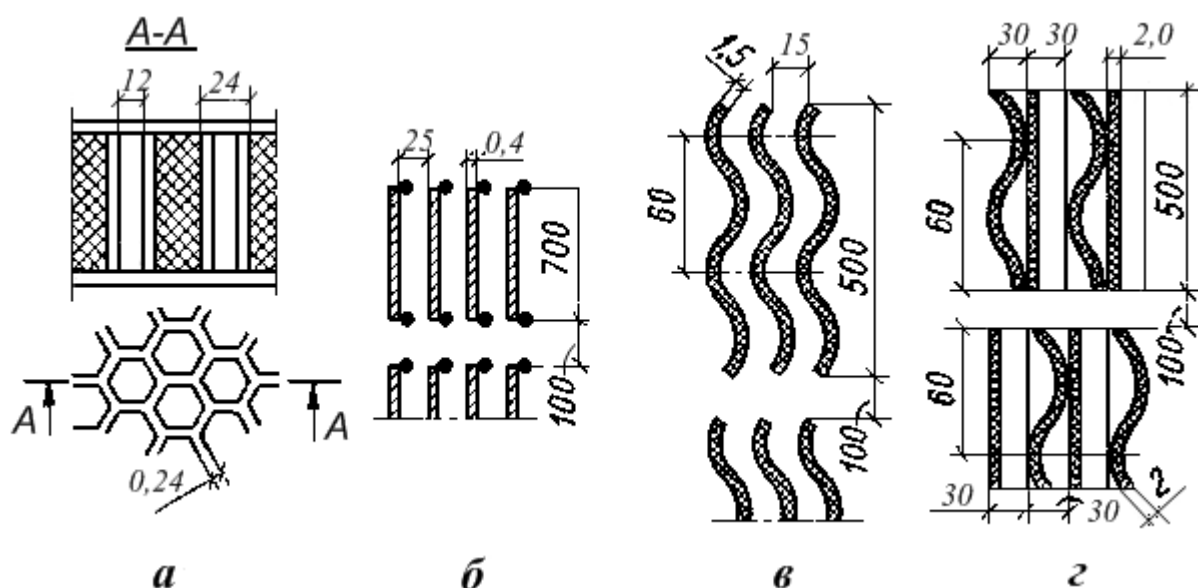


Рисунок 3 – Оросители из пластмассы

Водораспределительная система

Водораспределительная система предназначена для равномерного распределения охлаждаемой воды по поверхности орошения градирни, в результате которого создается необходимая поверхность водного потока, определяющая его охлаждающую способность. При этом система не должна создавать ощутимых препятствий прохождению и распределению потока воздуха.

Современные вентиляторные градирни строятся, как правило, с напорными трубчатыми системами распределения воды. В этом случае напор воды в системе создается насосом, а в градирне разбрызгивание воды производится форсунками. Большое распространение получили гидравлические центробежные форсунки с тангенциальным подводом воды в

камеру закручивания (рис. 4 и табл. П.5).

Центробежная форсунка состоит из трех основных элементов: входного тангенциального канала 1, камеры закручивания 2 и выходного отверстия 3. Принцип действия ее заключается в том, что поток жидкости сначала закручивается, а затем выходит через сопло. В процессе сужения потока значительно возрастает окружная составляющая скорости, возникают центробежные силы, образующие в выходном отверстии тонкую пленку кольцевого сечения, которая по выходе из форсунки распадается на капли, образуя факел в виде полого конуса.

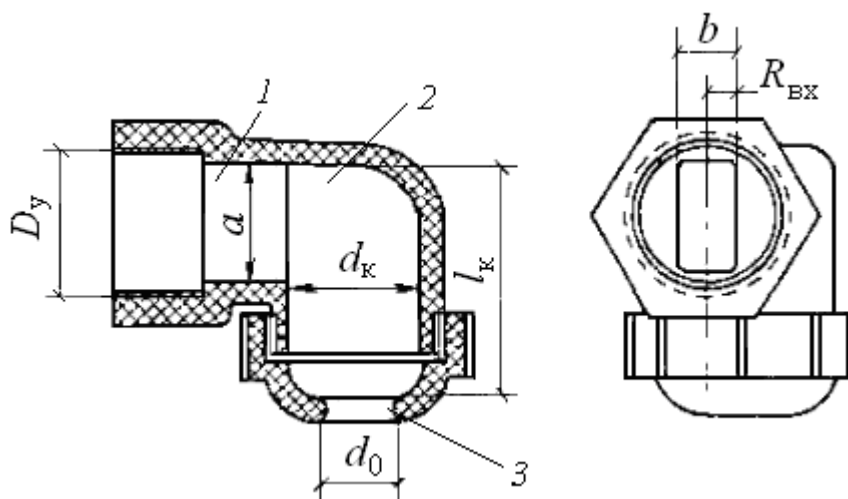


Рисунок 4 – Центробежная форсунка с тангенциальным подводом в камеру закручивания

Вдоль оси форсунки при этом образуется воздушный вихрь. Выходное отверстие таким образом заполнено кольцевым потоком или пленкой только по периферии. Центральная часть занята воздушным вихрем. На орошаемую поверхность капли выпадают в виде кольца.

Самым распространенным материалом для изготовления форсунок в настоящее время является пластмасса. Форсунки из пластмассы не подвергаются коррозии в условиях работы градирен, они дешевле, проще в изготовлении и имеют меньшую шероховатость внутренней поверхности. Они обладают также более устойчивыми гидравлическими характеристиками в процессе эксплуатации, так как при выделении из воды взвешенных частиц и минеральных солей отложения в этих форсунках не образуются.

Центробежные форсунки в вентиляторных градирнях рекомендуется устанавливать выходными отверстиями вниз, так как при направлении вверх

они будут создавать довольно высокие факелы, что может привести к увеличению уноса капель воды из градирни. При направлении форсунок вниз, исходя из условия обеспечения более равномерного распределения воды, они устанавливаются над оросителями на расстоянии $0,2 \div 1,0$ м.

Для оценки эффективности распределения воды по оросителю необходимо знать следующие гидравлические характеристики форсунок: коэффициент расхода форсунки, угол раскрытия факела разбрызгивания (габариты факела), распределение воды в зоне факела единичной форсунки и по орошаемой площади при групповой работе форсунок. Эти характеристики определяются экспериментально на специальных стендах.

В случае необходимости можно форсировать работу градирни, увеличив напор воды и расход через форсунки одной секции. Такая ситуация может возникнуть, например, при аварийной остановке одной из секций.

Важной характеристикой работы форсунок при групповой их работе является равномерность распределения воды по поверхности оросителя. Для более равномерного распределения воды целесообразно размещение форсунок в шахматном порядке с одинаковыми или близкими значениями шагов в продольном и поперечном направлениях.

Каплеуловители

Схемы каплеуловителей основных типов показаны на рис. 5, а их технологические характеристики приведены в табл. П.8.

К каплеуловителям (водоуловителям, сепараторам) предъявляются требования максимально возможного снижения выноса капель из градирни с потоком воздуха при минимальном аэродинамическом сопротивлении.

Все известные конструкции каплеуловителей работают по одному принципу – осаждение летящих вверх капель воды на препятствии за счет сил инерции при отклонении воздушного потока, огибающего это препятствие. В качестве препятствия используются доски, планки, соты (каналы) различной конфигурации, волокна сеток, располагаемые в 1÷3 ряда, а также. Часто в качестве каплеуловителя используется часть оросителя меньшей высоты.

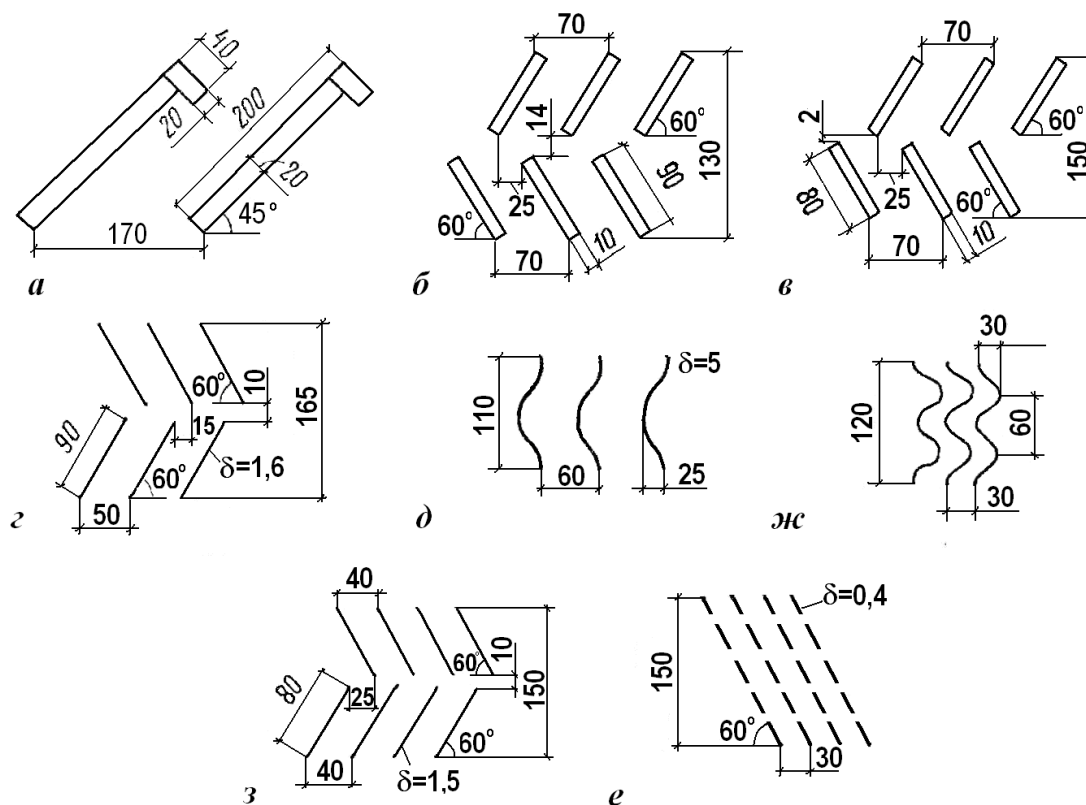


Рисунок 5 – Схемы каплеуловителей

Водоулавливающая способность каплеуловителей существенно зависит от их конструкции.

Вентиляторные установки

Одним из необходимых условий эффективной работы вентиляторных градирен является правильный выбор вентиляторов.

Для градирен обычно используются осевые вентиляторы. При применении вентиляторов, создающих разрежение, обеспечивается более равномерное распределение воздуха по поперечному сечению в основании градирни, чем при использовании нагнетательных вентиляторов, так как при входе воздуха с большой скоростью и повороте его под прямым углом для движения вверх создается неравномерное поле скоростей.

Вентиляторы, создающие разрежение, выбрасывают воздух вверх со скоростью 6–10 м/с, и вертикальное направление потока влажного воздуха после вентиляторов сохраняется на участке высотой 10–25 м, что практически исключает возможность рециркуляции воздуха. При использовании

нагнетательных вентиляторов воздух выходит из градирни со скоростью около 1,0–2,5 м/с, и уже сравнительно слабый ветер может приводить к рециркуляции, т.е. задуванию уходящего теплого влажного воздуха вниз и вторичному всасыванию его вентилятором, что ведет к резкому ухудшению испарительного охлаждения воды.

Нагнетательные вентиляторы применяются для градирен с площадью орошения не более 16 м². В холодную погоду лопасти нагнетательного вентилятора могут обмерзать, так как на них попадают вместе с холодным воздухом частицы воды, выносимые из градирни. В вентиляторах, создающих разрежение, возможность обмерзания во время работы исключается, так как лопасти их постоянно омываются теплым воздухом.

С конструктивной точки зрения установка нагнетательных вентиляторов более проста, и они более устойчивы ввиду того, что их можно располагать на фундаментах, непосредственно на земле или на крыше здания. Облегчается доступ для их ремонта и обслуживания, проще соединения с электродвигателем, чем у всасывающих вентиляторов. С несущего каркаса градирни снимается нагрузка от вентилятора, редуктора и двигателя, что облегчает каркас и исключает возможность его вибрации во время работы вентилятора.

Лопастей вентиляторов могут изготавливаться из алюминиевых сплавов, пластмасс, нержавеющей стали или обыкновенной стали со специальным антикоррозионным покрытием.

Параметры наружного воздуха оказывают существенное влияние на степень охлаждения воды в градирне. Так как эти параметры в течение года значительно отличаются от расчетных, желательно количество подаваемого вентилятором воздуха регулировать соответственно этим изменениям. Такая регулировка подачи вентиляторов может осуществляться поворотом лопастей, а также изменением частоты вращения вала вентилятора.

Технические характеристики осевых вентиляторов марки ВГ (вентиляторы градирен) (рис. 6) и осевых вентиляторов общепромышленного назначения марки 06-300 (рис. 7) приведены в табл. П.9, а геометрические характеристики вентиляторов – в табл. П.10 и П.11.

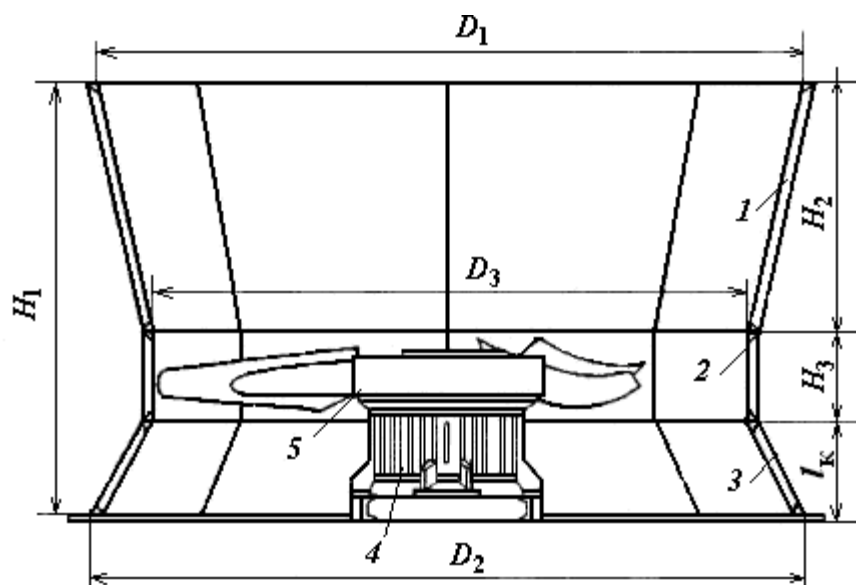


Рисунок 6 – Вентиляторная установка марки ВГ

1 – диффузор; 2 – корпус; 3 – коллектор; 4 – привод; 5 – рабочее колесо

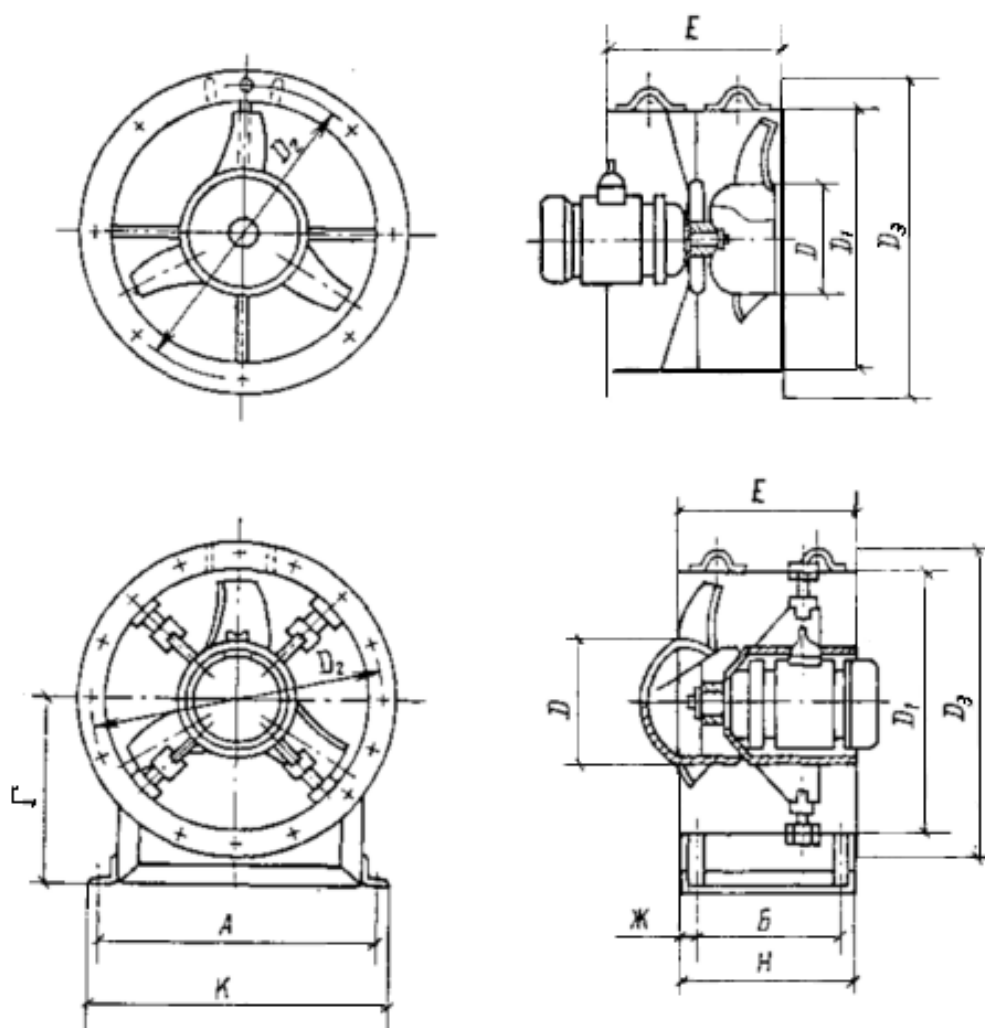


Рисунок 7 – Осевые вентиляторы марки 06-300 общепромышленного назначения №4; 5; 6,3; 8; 10 и 12,5

ПРИНЦИП ОХЛАЖДЕНИЯ ВОДЫ В ГРАДИРНЯХ

При охлаждении воды в градирнях часть теплоты передается атмосферному воздуху за счет поверхностного испарения воды (превращения части воды в пар с переносом его молекул посредством диффузии и конвекции в воздух), другая часть – конвективным теплообменом, т.е. за счет разницы значений температур воды и воздуха.

Сущность испарительного охлаждения состоит в следующем. Согласно кинетической теории, молекулы воды находятся в беспорядочном тепловом движении, при этом скорости их колеблются в широких пределах. Те молекулы, которые обладают наибольшей скоростью (наибольшей кинетической энергией), вырываются в пространство над поверхностью воды (испарение). При этом могут оторваться от воды только молекулы, расположенные вблизи ее поверхности, у которых составляющая скорости, нормальная к этой поверхности, достаточно велика и способна преодолеть силы молекулярного притяжения. Молекулы воды, оторвавшиеся от поверхности, при столкновении с молекулами воздуха, могут быть отброшены обратно к поверхности воды и вновь поглотиться водой (конденсация). Часть же оторвавшихся от поверхности воды молекул водяного пара проникает между молекулами воздуха, увеличивая влагосодержание и относительную влажность воздуха. Эта потеря водой части молекул с высокой кинетической энергией и составляет сущность процесса испарения. Оставшиеся молекулы обладают более низким уровнем кинетической энергии, а, следовательно, и температуры (так как температура есть мера средней кинетической энергии молекул). В результате вода остывает, а у ее поверхности образуется слой воздуха, полностью насыщенный водяными парами. Основная же масса воздушного потока,двигающаяся над поверхностью воды в градирнях, не насыщена водяными парами. Таким образом, «движущей силой» процесса испарения воды является разность парциальных давлений пара у поверхности воды и в ядре воздушного потока.

Поток теплоты, возникающий в результате теплоотдачи соприкосновением, зависит от разности температур воды и воздуха и может быть направлен как от воды к воздуху, так от воздуха к воде в зависимости от того, какая из этих сред имеет более высокую температуру. При температуре воды больше температуры воздуха потоки теплоты за счет испарения $Q_{\text{и}}$ и

конвективного теплообмена Q_k направлены от воды к воздуху.

При снижении температуры воды до температуры воздуха по сухому термометру поток теплоты за счет конвективного теплообмена становится равным нулю ($Q_k = 0$), а при последующем снижении температуры воды Q_k становится отрицательными, т.е. поток теплоты направлен от воздуха к воде. При снижении температуры воды до температуры воздуха по влажному термометру поток теплоты за счет конвективного теплообмена от воздуха к воде становится равным потерям теплоты при испарении, и наступает равновесное динамическое состояние, при котором результирующая составляющая теплоотдачи равна нулю ($Q_k = Q_{\text{и}}$), и вода далее не снижает свою температуру. Таким образом, температура воздуха по влажному термометру является теоретическим пределом охлаждения воды в градирне. В реальности температура охлаждающей воды на выходе из градирни несколько больше температуры воздуха по влажному термометру. Степень недоохлаждения воды в вентиляторных градирнях составляет примерно 4–6 °С и даже больше, если распределение воды, подаваемой на ороситель, осуществляется недостаточно равномерно, и есть зоны, где воздух проходит, не контактируя с пленкой воды.

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ГРАДИРНИ

При тепловом расчете градирни используются следующие параметры, часть из которых может быть задана, а остальные определяются в процессе расчета:

- объемный расход воды $V_{\text{ж}}$, м³/ч;
- значения начальной $t_{\text{ж1}}$ и конечной $t_{\text{ж2}}$ температуры воды, °С;
- тепловая нагрузка на градирню Q , кВт;
- расчетные параметры наружного воздуха, которые соответствуют климатической зоне или задаются для особых условий эксплуатации;
- технические характеристики градирни;
- характеристики вентилятора, т.е. подача V'' , тыс. м³/ч и напор H , мм вод.ст. (или Па);
- геометрические и гидравлические характеристики форсунок, используемых для подачи воды на ороситель.

В зависимости от практической задачи возможны разные цели расчета градирни.

1. Расчет вновь проектируемой градирни для заданного расхода воды, тепловой нагрузки и атмосферных условий.

2. Расчет градирни для обслуживания отдельного объекта, если по условиям эксплуатации вода из центральной системы оборотного водоснабжения предприятия недостаточно охлажденная. При этом градирня может работать или на доохлаждение воды, взятой из центральной системы водоснабжения, или автономно.

3. При необходимости проведения реконструкции существующей градирни с целью увеличения ее тепловой и гидравлической нагрузок.

Выбор расчетных параметров

Расчетные параметры входящего в градирню воздуха задаются в соответствии со следующими соображениями.

Градирни рассчитываются обычно на неблагоприятные для их работы атмосферные условия в летние месяцы года. Чем выше расчетные значения температуры и влажности атмосферного воздуха, тем больше размеры градирни или больше число ее секций и, соответственно, выше затраты на ее сооружение. В то же время выбор слишком низких значений расчетных температуры и влажности воздуха может привести к тому, что фактические температуры воды на выходе из градирни будут в жаркое время года превышать расчетную температуру $t_{ж2}$. Это повлечет за собой недоохлаждение производственного продукта в теплообменной аппаратуре, или снижение мощности и КПД паротурбинной установки, а также повышенный расход электроэнергии в компрессорной станции и при работе холодильных установок и т.д. Следовательно, при выборе расчетных параметров наружного воздуха необходимо выбрать оптимальные параметры, которые допускают повышение температуры воды $t_{ж2}$ сверх расчетной для условий технологического процесса производства, но ограничивают период этого повышения.

При расчете градирни рекомендуется исходить из среднесуточных значений температур и влажностей атмосферного воздуха в летние месяцы по многолетним наблюдениям. Среднесуточные температуры и влажности вычисляются по данным нескольких значений этих величин, измеренных в течение дня. Для обозначения допустимых отклонений параметров наружного воздуха от расчетных в течение летнего периода (который принимается равным 100 дням) вводится понятие *обеспеченности*

метеорологических параметров (90 %, 95 % и 99 %). В качестве расчетных обычно принимаются такие значения ϑ_1 и τ , которые превосходят среднесуточные при жестких требованиях – в течение не более 1 дня в году (обеспеченность 99 %), при обычных требованиях – в течение не более 5 дней в году (обеспеченность 95 %), а при менее жестких требованиях – в течение не более 10 дней в году (обеспеченность 90 %).

При выборе обеспеченности метеорологических параметров для расчетов градирен следует учитывать влияние на работу технологического оборудования превышения температуры охлажденной воды над расчетной. Потребителей воды подразделяют на три категории по уровню требований к температурам охлажденной воды (табл. 1) [7, стр. 229].

Среднесуточные метеорологические условия для различных городов Украины представлены в табл. П.1.

Таблица 1 – Обеспеченность метеорологических параметров при расчете градирен в зависимости от категории потребителей воды

Категория потребителя воды	Вызываемые нарушения в результате превышения температуры охлажденной воды над расчетной	Обеспеченность при расчете градирен, %
I	Нарушение или остановка технологического процесса производства в целом и как следствие – значительные убытки	99
II	Временное нарушение технологического процесса отдельных установок	95
III	Временное снижение экономичности технологического процесса производства в целом и отдельных установок	90

При расчете градирни используются следующие параметры ее работы.

Расход воды (гидравлическая нагрузка) обычно задается технологами производства, исходя из теплотехнологических расчетов охлаждаемого водой оборудования – конденсаторов, холодильников, компрессоров, различных технологических аппаратов, металлургических агрегатов и др.

Расход воздуха (расчетная подача воздуха вентилятором) определяется аэродинамическим расчетом градирни, а на предварительном этапе расход воздуха определяется его табличным значением, т.е. нормативной подачей

выбранного вентилятора при его максимальном КПД.

Температуры входящей $t_{ж1}$ и выходящей $t_{ж2}$ воды устанавливаются технологами производства на основании теплотехнических расчетов с учетом характеристик охлаждаемого оборудования. Следует иметь в виду, что температуры оборотной воды, особенно $t_{ж2}$, могут иметь весьма существенное влияние на параметры технологического процесса, размеры градирен, диаметры труб, подачу насосов и производительность другого оборудования, а также на потребление электроэнергии. Поэтому целесообразно определять $t_{ж2}$, а также расход охлаждающей воды путем технико-экономических расчетов совместной работы всех сооружений водооборотного цикла – технологического оборудования, градирен, циркуляционной насосной станции и установок для очистки и подготовки воды.

Как уже отмечалось, теоретическим пределом охлаждения воды воздухом является температура воздуха по влажному термометру τ . Она достигается путем увлажнения воздуха без дополнительного отвода или подвода теплоты до состояния насыщения ($\phi = 100\%$), т.е. при изобарном испарении жидкости в воздух. Достижение водой температуры воздуха по влажному термометру τ возможно лишь при идеальных условиях охлаждения, создание которых в реальных условиях экономически не оправдано (большая высота оросителя, малая плотность орошения при большом расходе воздуха и т.д.). В этом случае при проектировании рекомендуется принимать расчетное значение температуры $t_{ж2}$, исходя из условия, чтобы разность температур $t_{ж2} - \tau$ была не менее 4°C .

Технологические характеристики оросителя принимаются по данным испытаний фирм-производителей.

Площадь оросителя в плане (градирни, секции) определяется расчетом, но может быть и задана (в зависимости от назначения расчета).

Основные уравнения теплового расчета градирни

Баланс теплоты, отдаваемой в градирне водой и воспринимаемой воздухом, представляется в следующем виде

$$Q = c_{рж} [G_{ж} (t_{ж1} - t_{ж2})] = G_{с.в} (I_2 - I_1), \quad (1)$$

где $c_{рж}$ – удельная массовая изобарная теплоемкость воды, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; $G_{ж}$ – массовый расход воды, $\text{кг}/\text{с}$; $G_{с.в}$ – массовый расход сухого воздуха,

кг сух. в-ха/с; $t_{ж1}, t_{ж2}$ – начальное и конечное значение температуры воды, °С; I_1, I_2 – начальное и конечное значение энтальпии воздуха, проходящего через градирню, кДж/кг.

При тепловом расчете градирен обычно задаются величины расходов и начальные параметры воды и воздуха, а конечные параметры $t_{ж2}, I_2, d_2$ остаются неизвестными. Поэтому уравнение теплового баланса дополняется зависимостями, описывающими процесс тепломассообмена между водой и воздухом в оросителе градирни.

Уравнение передачи теплоты от воды к воздуху в оросителе имеет вид

$$Q = \beta_{xv} \cdot V_{op} \cdot k \cdot \Delta I_{cp}, \quad (2)$$

где β_{xv} – объемный коэффициент массоотдачи средний по объему оросителя, относящийся к разности влагосодержаний, кг/(м³·с·кг/кг сух.в-ха);

V_{op} – объем оросителя, м³;

k – поправочный коэффициент, учитывающий уменьшение расхода воды за счет ее испарения;

ΔI_{cp} – средняя разность значений удельных энтальпий влажного воздуха, т.е. разность значений энтальпии насыщенного воздуха в пограничном слое у поверхности плёнки воды, стекающей по оросителю, и энтальпии воздуха в ядре потока между пластинами оросителя, кДж/кг сух. в-ха.

На сегодняшний день не существует теоретических методов для определения объемного коэффициента массотдачи β_{xv} из-за неизвестной площади поверхности контакта воды с воздухом в объеме оросителя. Поэтому значение β_{xv} находится экспериментально для каждого типа оросителя, является действительным только для заданного способа организации контактной поверхности, т.е. для заданной конструкции оросителя, работающего в тех условиях, при которых производились измерения параметров, и не может быть перенесено на другие типы оросителей. Величина β_{xv} находится в прямой зависимости от количества воздуха и воды, проходящих через градирню, и от типа и конструкции оросителя градирни. Эта зависимость в общем виде описывается эмпирической формулой:

$$\beta_{xv} = A \cdot \lambda^m \cdot g_{ж}, \quad (3)$$

$g_{\text{ж}}$ – плотность орошения, (кг/с·м²); $\lambda = G_{\text{в}}/G_{\text{ж}}$ – отношение массового расхода воздуха к массовому расходу воды; коэффициенты A и m являются постоянными для определенной конструкции оросителя (данные для асбоцементных оросителей приведены в табл. П.4, более полные сведения о параметрах различных оросителей можно найти в [2, с. 164; 3, с. 207]).

Коэффициент k может быть найден как [3, с. 42]

$$k = 1 - \frac{c_{\text{пж}} t_{\text{ж2}}}{r}, \quad (4)$$

где r – теплота парообразования при температуре $\bar{t} = 0,5(t_{\text{ж1}} + t_{\text{ж2}})$, кДж/кг.

Средняя разность удельных энтальпий влажного воздуха в оросителе градирни определяется следующим образом. Если отношение разностей энтальпий $\Delta I_{\text{б}}/\Delta I_{\text{м}} = (I_1'' - I_2)/(I_2'' - I_1) > 1,8$, то средняя разность находится по формуле:

$$\Delta I_{\text{ср}} = \frac{\Delta I_{\text{б}} - \Delta I_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta I_{\text{б}}}{\Delta I_{\text{м}}}} = \frac{(I_1'' - I_2) - (I_2'' - I_1)}{\ln \frac{(I_1'' - I_2)}{(I_2'' - I_1)}}. \quad (5)$$

Если же $\Delta I_{\text{б}}/\Delta I_{\text{м}} = (I_1'' - I_2)/(I_2'' - I_1) \leq 1,8$, то средняя разность может быть найдена как среднее арифметическое:

$$\Delta I_{\text{ср}} = 0,5(\Delta I_{\text{б}} + \Delta I_{\text{м}}) = 0,5((I_1'' - I_2) + (I_2'' - I_1)), \quad (5a)$$

где I_1, I_2 – удельные энтальпии воздуха в ядре потока между пластинами при входе в ороситель и на выходе из него, кДж/кг сух.в-ха; I_1'', I_2'' – удельные энтальпии насыщенного воздуха у поверхности плёнки воды, стекающей по оросителю, т.е. при температуре воздуха, равной температуре воды, и относительной влажности $\varphi = 100$ %. Соответственно I_1'' – вверху оросителя и I_2'' – внизу оросителя.

Пример 1. *Спроектировать вентиляторную градирню для охлаждения оборотной воды, потребляемой компрессорной станцией завода.*

Исходные данные: расход воды $V_{\text{ж}} = 450 \text{ м}^3/\text{ч}$; тепловая нагрузка $Q = 4100 \text{ кВт}$; климатическая зона г. Харькова.

Тепловой расчет. В данном случае задачей теплового расчета градирни является выбор типоразмера градирни и числа секций, и далее в ходе поверочного расчета необходимо определить объем оросителя $V_{\text{ор}}$ и его высоту $h_{\text{ор}}$ и показать, что выбранная градирня соответствует заданным техническим условиям на ее проектирование.

Чтобы исключить возможность рециркуляции теплого воздуха целесообразно остановиться на конструкции градирни с вентилятором, создающим разрежение. Так как гидравлическая нагрузка сравнительно велика, подбираем многосекционную градирню.

По табл. П.2 выбираем размеры секции в плане $4 \times 4 \text{ м}$, т.е. площадь оросителя секции в плане $F_{\text{ор}}' = 16 \text{ м}^2$. Каждая секция оборудована вентилятором типа 1ВГ25.

Ороситель выбираем плёночный из волнистых асбоцементных листов с горизонтальным расположением гофр (рис. 2 (№4), табл. П.4). Ороситель такого типа не требует специального производства, а может быть смонтирован из асбоцементных листов выпускаемых шиферными заводами Украины.

Расчет производится последовательными приближениями.

Вначале, в первом приближении, определяем суммарную площадь оросителя в плане $F_{\text{ор}}$, исходя из рекомендуемых значений удельной тепловой нагрузки для вентиляторных градирен ($q = 90 \div 120 \text{ кВт}/\text{м}^2$) и плотности орошения для плёночного оросителя $g_{\text{ж}} = 8 \div 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2/\text{ч})$ [7, стр. 227]. Принимаем $q = 90 \text{ кВт}/\text{м}^2$ и $g_{\text{ж}} = 8 \text{ м}^3/(\text{м}^2/\text{ч})$, тогда $F_{\text{ор}} = Q/q = 4100/90 = 45,55 \text{ м}^2$ или $F_{\text{ор}} = V_{\text{ж}}/g_{\text{ж}} = 450/8 = 56,25 \text{ м}^2$. Для дальнейших расчетов принимаем большее значение площади оросителя $F_{\text{ор}}$.

Число секций многосекционной градирни находим как $N = F_{\text{ор}}/F_{\text{ор}}' = 56,25/16 = 3,5$. Принимаем $N = 4$.

Таким образом, в первом приближении выбрана многосекционная градирня из 4-х секций, с площадью каждой секции в плане 16 м^2 (типовой проект 921-6-28 [3, стр. 124]). В результате теплового расчёта при последующих приближениях число секций или конструкция оросителя могут быть уточнены.

Выполняем поверочный расчет градирни.

В результате выполнения поверочного расчета необходимо определить,

обеспечивает ли выбранная градирня при расходе воды $V_{\text{ж}}$ тепловую нагрузку Q для климатических условий г. Харькова.

Определяем расчетные параметры наружного воздуха.

Для условий работы компрессорной станции, согласно табл. 1, принимаем обеспеченность метеорологических параметров при расчёте градирни 90 %. Затем по табл. П.1 для г. Харькова и обеспеченности 90 % выбираем расчетные параметры наружного воздуха: температура сухого термометра $\theta_1 = 24,9^\circ\text{C}$, температура влажного термометра $\tau_1 = 18,6^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха $\varphi_1 = 52\%$.

Принимаем недоохлаждение воды на выходе из градирни до температуры воздуха по влажного термометру $\delta t = 4,4^\circ\text{C}$ (рекомендованное недоохлаждение воды до температуры мокрого термометра $4\div 6^\circ\text{C}$). Тогда $t_{\text{ж}2} = \tau_1 + \delta t = 18,6 + 4,4 = 23^\circ\text{C}$.

Понижение температуры воды в градирне выбранного типа может быть найдено из (1). Из уравнения видно, что степень охлаждения воды $\Delta t_{\text{ж}}$ зависит от тепловой нагрузки и расхода воды на градирню.

$$\Delta t_{\text{ж}} = t_{\text{ж}1} - t_{\text{ж}2} = Q / (G_{\text{ж}} \cdot c_{p\text{ж}}) = 4100 / (124,8 \cdot 4,18) = 7,86^\circ\text{C}.$$

Здесь из [5] $c_{p\text{ж}} = 4,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ – удельная теплоемкость воды при температуре $t_{\text{ж}2} = 23^\circ\text{C}$; $\rho_{\text{ж}} = 997,5 \text{ кг}/\text{м}^3$ – плотность воды при температуре $t_{\text{ж}2} = 23^\circ\text{C}$ (корректнее было бы рассчитывать эти параметры по средней температуре воды в градирне, однако температура воды на входе пока не известна, кроме того погрешность достаточно мала из-за небольшой величины степени охлаждения); массовый расход воды $G_{\text{ж}} = V_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} / 3600 = 450 \cdot 997,5 / 3600 = 124,8 \text{ кг}/\text{с}$.

Температура воды на входе в градирню обычно определяется из условий работы технологического оборудования, в котором применяется водяное охлаждение. Поэтому, если температура воды не задана в исходных данных, в данном расчете возможно говорить лишь об определении максимально допустимой температуры воды на входе в градирню, при которой возможно ее достаточное охлаждение при заданной тепловой нагрузке на градирню и климатических условиях места эксплуатации.

Максимально допустимая температура воды на входе в градирню

$$t_{ж1} = t_{ж2} + \Delta t_{ж} = 23 + 7,86 = 30,86 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Из табл. П.4 выбираем тип оросителя и определяем его геометрические характеристики: шаг установки листов $S_1 = 50,1$ мм, их толщина $\delta = 7$ мм; высота листов 1,22 м, коэффициенты $A = 0,59 \text{ м}^{-1}$, $m = 0,68$. Ороситель может быть одноярусным высотой 1,22 м или двухярусным. Для данного типа градирен используем двухярусный ороситель высотой $h_{ор} = 2 \times 1,22 = 2,44$ м. Выбираем ороситель с вертикальным расположением гофр.

Для используемого вентилятора типа 1ВГ25 для оптимальных условий его работы, т.е. при максимальном КПД вентилятора, по табл. П.9 определяем подачу воздуха $G'_в = 40$ кг/с или $V'_в = 33,3 \text{ м}^3/\text{с}$ (плотность воздуха принята $\rho_в = 1,2 \text{ кг/м}^3$).

Расход воды на одну секцию $G'_ж = G_{ж}/N = 124,8/4 = 31,1$ кг/с. Тогда отношение массового расхода воздуха к расходу воды $\lambda = G'_в/G'_ж = 40/31,1 = 1,3$.

Расчетное значение плотности орошения

$$g_{ж} = G_{ж}/(F'_{ор} N) = 124,8/(16 \cdot 4) = 1,94 \text{ кг/}(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Величина объемного коэффициента массоотдачи

$$\beta_{хв} = A \cdot \lambda^m \cdot g_{ж} = 0,59(1,3)^{0,68} 1,94 = 1,36 \text{ кг/}(\text{м}^3 \cdot \text{с}).$$

Определяем значение поправочного коэффициента k , учитывающего уменьшение расхода воды в результате испарения, как [3, с. 42]

$$k = 1 - c_{рж} t_{ж2} / r = 1 - 4,18 \cdot 23 / 2446,8 = 0,96,$$

где r – теплота парообразования, $r = 2446,8$ кДж/кг при температуре $t_{ж2} = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [6].

Для нахождения средней разности энтальпий по уравнению (5) определим величины, входящие в формулу.

Значения энтальпии воздуха определяем по $I-d$ диаграмме (рис. 8).

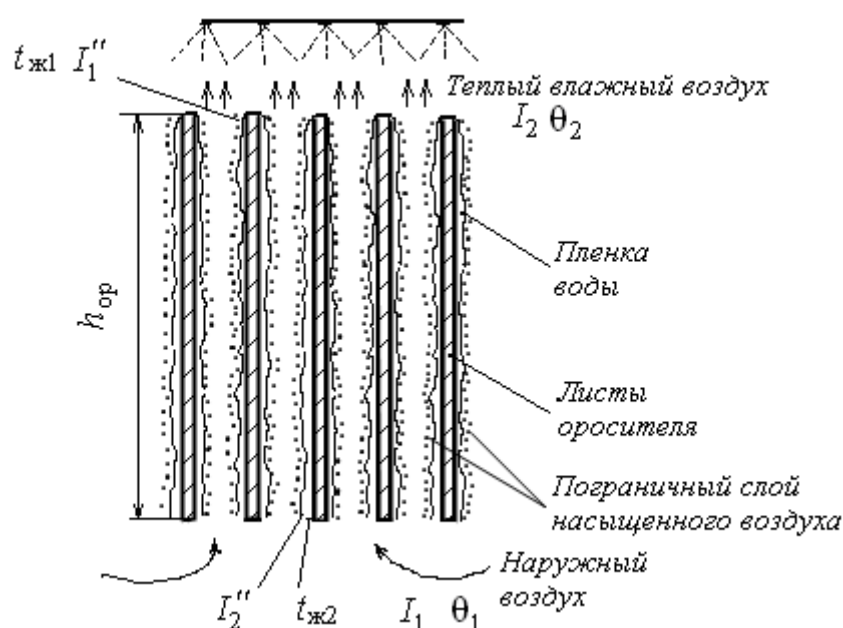
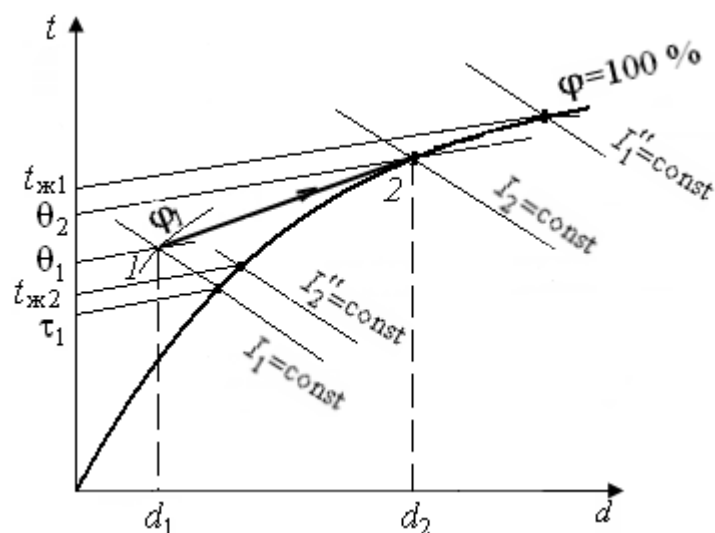


Рисунок 8 – К определению энтальпий влажного воздуха

Насыщенный воздух вблизи пленки воды в верхней части оросителя имеет температуру $\theta = t_{ж1} = 30,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительную влажность $\phi_1'' = 100 \text{ \%}$.

На пересечении θ и ϕ_1'' находим его энтальпию $I_1'' = 103,5 \text{ кДж/кг}$.

Энтальпия насыщенного воздуха вблизи пленки воды, выходящей снизу из оросителя при $\theta = t_{ж2} = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\phi_2'' = 100 \text{ \%}$ равна $I_2'' = 68 \text{ кДж/кг}$.

Энтальпия наружного воздуха при принятых расчётных параметрах $I_1 = 51 \text{ кДж/кг}$, влагосодержание $d_1 = 10,25 \text{ г/кг.с.в.}$

Энтальпию влажного воздуха I_2 , выходящего из верхней части оросителя, можно определить из уравнения :

$$I_2 = I_1 + \frac{Q}{N \cdot G_{\text{с.в.}} \cdot k} = 51 + \frac{4100}{4 \cdot 39,6 \cdot 0,96} = 78 \text{ кДж /кг с.в.},$$

где $G_{\text{с. в.}}$ – расход сухой составляющей воздуха, проходящего через градирню.

$$G_{\text{с.в.}} = \frac{G'_B}{1 + d_1} = \frac{40}{1 + 10,25 \cdot 10^{-3}} = 39,6 \text{ кг/с},$$

где влагосодержание d_1 подставляется в кг/кг с.в.

Отношение разностей энтальпий $\Delta I_6 / \Delta I_M = (I''_1 - I_2) / (I''_2 - I_1) = (103,5 - 78) / (68 - 51) = 1,5 \leq 1,8$, следовательно, для нахождения средней разности энтальпий используем формулу (5а):

$$\begin{aligned} \Delta I_{\text{ср}} &= 0,5(\Delta I_6 + \Delta I_M) = 0,5((I'' - I_2) + (I''_2 - I_1)) \\ \Delta I_{\text{ср}} &= 0,5((I''_1 - I_2) + (I''_2 - I_1)) = 0,5((103,5 - 78) + (68 - 51)) = 21 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

На выходе из оросителя градирни воздух насыщенный, т.е. $\phi_2 = 100 \%$. Поэтому по I - d диаграмме можно определить $\theta_2 = 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $d_2 = 20,6 \text{ г/кг с.в.}$

Объем рабочего пространства оросителя всех секций определяется из выражения (2)

$$V_{\text{ор}} = Q / (\beta_{\text{хв}} \cdot k \cdot \Delta I_{\text{ср}}) = 4100 / (1,36 \cdot 0,96 \cdot 21) = 149,3 \text{ м}^3.$$

Расчетная высота оросителя $h_{\text{ор}}^p$, необходимая для обеспечения заданного теплосъёма и охлаждения воды

$$h_{\text{ор}}^p = V_{\text{ор}} / (F'_{\text{ор}} N) = 149,3 / (16 \cdot 4) = 2,33 \text{ м}.$$

Полученное значение $h_{\text{ор}}^p$ меньше высоты двухярусного оросителя $h_{\text{ор}} = 2,44 \text{ м}$, следовательно, возможно дополнительное охлаждение воды ниже $t_{\text{ж2}} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$.

Если бы высоты двухярусного оросителя также было недостаточно, необходимо было бы изменить тип оросителя или увеличить число секций (при этом изменятся коэффициенты A и m).

РАСЧЕТ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ

Расчет системы распределения воды в градирне включает в себя следующие пункты:

- выбор типоразмера форсунок и их эксплуатационных характеристик;
- определение числа форсунок и их размещение над оросителем с помощью распределительных труб;
- определение коэффициента неравномерности распределения воды по оросителю;
- определение размеров распределительных и коллекторных труб;
- гидравлический расчет системы распределения воды.

Опытные данные о неравномерности распределения воды группой форсунок при взаимодействии факелов разбрызгивания в диапазоне напоров 10÷40 кПа могут быть представлены следующей эмпирической зависимостью [3]

$$k_{\text{нр}} = M k'_{\text{нр}} \left[f_{\text{я}} \cdot 9,81 / (H_{\text{ф}} R_{\text{ф}}) \right]^{0,4}, \quad (6)$$

где $f_{\text{я}}$ – площадь ячейки в сетке размещения форсунок в плане, м²;

$H_{\text{ф}}$ – избыточное давление воды перед форсунками, кПа ;

$R_{\text{ф}}$ – радиус факела, м (табл. П.7);

$k'_{\text{нр}}$ – коэффициент неравномерности распределения воды в зоне факела отдельно работающей форсунки (табл. П.7);

M – безразмерный коэффициент, зависящий от расстояния форсунок до оросителя и направления факелов разбрызгивания. При установке тангенциальных форсунок выходными отверстиями вниз при расстоянии от сопел до оросителя $l = 0,5$ м $M = 1,3$; при $l = 0,75$ м $M = 0,9$; при $l = 1$ м $M = 0,5$. Коэффициент неравномерности $k_{\text{нр}} < 0,25$ считается допустимым. Для уменьшения коэффициента неравномерности целесообразно увеличивать число форсунок, расстояние от их сопел до оросителя или использовать форсунки с бóльшим углом раскрытия факела, а соответственно и $R_{\text{ф}}$.

При движении воды по распределительной трубе, на которой установлены форсунки, происходит постепенное уменьшение расхода и скорости течения, но для вентиляторных градирен распределительные трубы выполняются постоянного по длине диаметра. Рекомендуется задавать

повышенное значение скорости движения воды в начале распределительной трубы $w_p = 1,5\text{--}2,5$ м/с.

При упрощенном расчете считается, что вода в коллекторной трубе движется по всей длине с одинаковой скоростью, т.е. не учитывается ее подача в распределительные трубы. Аналогичное допущение принимается и для распределительных труб, для которых скорость движения и расход воды также считаются постоянными, без учета подачи воды на форсунки.

Магистральные трубопроводы рассчитываются при скорости движения воды $w_m = 1,0\text{--}1,5$ м/с.

Пример 2. Произвести гидравлический расчет системы распределения воды для градири, рассматриваемой в примере 1.

В качестве первого приближения выбираем тангенциальную форсунку с условными диаметрами входного и выходного отверстий $D_y = 20 \times 12$ мм (табл. П.7). Направление входного отверстия – вниз ($M = 0,5$), расстояние от сопла до оросителя 1 м. Расчетное избыточное давление воды перед форсунками $H_\phi = 3,0$ м вод. ст, при котором объемный расход через одну форсунку $V_\phi = 1,46 \text{ м}^3/\text{ч} = 4,06 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$.

Объемный расход воды на одну секцию

$$V'_\text{ж} = V_\text{ж} / N = (450/3600)/4 = 0,031 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Число форсунок, устанавливаемых в одной секции,

$$n'_\phi = V'_\text{ж} / V_\phi = 0,031 / (4,06 \cdot 10^{-4}) = 78.$$

Так как распределение воды по оросителю должно быть равномерным, принимаем число распределительных труб $n_{p.t} = 9$ и число форсунок на каждой трубе $n_{\phi.t} = 9$, т.е. общее число форсунок в секции $n'_\phi = 9 \cdot 9 = 81$.

Уточняем объемный расход воды на одну форсунку

$$V_\phi^p = \frac{V'_\text{ж}}{n} = \frac{0,031}{81} = 3,83 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}.$$

При размещении оросительной системы в секции размером

$a \times b = 4 \times 4$ м, расстояние между трубами $b_{\text{тр}} = 4,0/9 = 0,44$ м, расстояние между форсунками $b_{\text{ф}} = (4,0 - 0,185)/9 = 0,42$ м (считаем, что расстояние от стены до распределительной трубы равно половине расстояния между трубами, а расстояние от краев распределительной трубы до форсунок в ней – равно половине расстояния между форсунками). Тогда площадь ячейки в сетке размещения форсунок в плане

$$f_{\text{я}} = b_{\text{тр}} \cdot b_{\text{ф}} = 0,44 \cdot 0,42 = 0,185 \text{ м}^2.$$

Для выбранной форсунки и принятом расстоянии до оросителя $l = 1$ м уточняем интерполяцией напор воды по табл. П.7: при расходе воды через одну форсунку $V_{\text{ф}}^{\text{р}} = 3,83 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с} = 1,379 \text{ м}^3/\text{ч}$ напор составит $H_{\text{ф}} = 2,55$ м вод. ст. = 25 кПа. Тогда коэффициент неравномерности распределения воды в зоне факела отдельно работающей форсунки $k'_{\text{нр}} = 0,853$, а радиус факела $R_{\text{ф}} = 0,705$ м (табл. П.7).

Коэффициент неравномерности

$$k_{\text{нр}} = M k'_{\text{нр}} \left[f_{\text{я}} \cdot 9,81 / (H_{\text{ф}} R_{\text{ф}}) \right]^{0,4} = \\ = 0,5 \cdot 0,853 \left[0,185 \cdot 9,81 / (25 \cdot 0,705) \right]^{0,4} = 0,172.$$

Значение $k_{\text{нр}} < 0,25$ считается допустимым, и поэтому принимается выбранное размещение форсунок над оросителем.

Расчет диаметров трубопроводов

Объемный расход воды на одну распределительную трубу $V_{\text{р}}$ определяется как $V_{\text{р}} = V'_{\text{ж}} / n_{\text{р.т}} = 0,031/9 = 0,0035 \text{ м}^3/\text{с}$.

Диаметры труб находятся из уравнения неразрывности $V = f \cdot w$, где V – объемный расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; $f = \pi d^2 / 4$ – площадь проходного сечения трубы, м^2 ; w – скорость движения воды, $\text{м}/\text{с}$. Таким образом

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot w}}.$$

Диаметр подводящей трубы, по которой вода поднимается к коллектору

и оросительной системе при $w_{п.т} = 1,5$ м/с

$$d_{п.т} = \sqrt{4V'_{ж}/(\pi w_{п.т})} = \sqrt{4 \cdot 0,031/(3,14 \cdot 1,5)} = 0,163 \text{ м.}$$

Выбираем трубу с внутренним диаметром 184 мм и толщиной стенки 5 мм (табл. П.14).

Определяем расчетную скорость течения воды

$$w_{п.т} = 4 \cdot V'_{ж}/(\pi \cdot d_{п.т}^2) = 4 \cdot 0,031/(3,14 \cdot 0,184^2) = 1,17 \text{ м/с.}$$

Приняв $w_p = 2$ м/с, определим диаметр распределительных труб

$$d_p = \sqrt{4V_p/(\pi w_p)} = \sqrt{4 \cdot 0,0035/(3,14 \cdot 2)} = 0,047 \text{ м.}$$

Выбираем трубу с внутренним диаметром 51 мм и толщиной стенки 3 мм (табл. П.14).

Определяем расчетную скорость течения воды

$$w_p = 4 \cdot V_p/(\pi \cdot d_p^2) = 4 \cdot 0,0035/(3,14 \cdot 0,051^2) = 1,7 \text{ м/с.}$$

При расчете диаметра коллекторной трубы принимаем скорость движения воды $w_k = 2$ м/с. Так как из распределительной трубы вода поступает в коллектор и расходится на два потока (вправо и влево), соответственно, расход воды в коллекторе принимаем равным $V_k = V_p / 2 = 0,0035/2 = 0,00175 \text{ м}^3/\text{с.}$

Диаметр коллектора находим как

$$d_k = \sqrt{4V_k/(\pi w_k)} = \sqrt{4 \cdot 0,00175/(3,14 \cdot 2)} = 0,033 \text{ м.}$$

Выбираем трубу с внутренним диаметром 33 мм и толщиной стенки 2,5 мм (табл. П.14). В связи с совпадением расчетного и принятого диаметра, действительная скорость воды в коллекторе будет равна принятой $w_k = 2$ м/с.

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ГРАДИРНИ

Целью расчета является определение полного аэродинамического сопротивления градирни и затем нахождение соответствующего этому сопротивлению действительного расхода воздуха через градирню по аэродинамической характеристике вентилятора.

Полное аэродинамическое сопротивление градирни представляет собой сумму местных сопротивлений по тракту движения воздуха

$$P_{\text{полн}} = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \frac{\zeta_i \rho_{\text{в}} w_i^2}{2}, \quad (7)$$

где ζ_i – коэффициент местных сопротивлений в i -м сечении градирни; w_i – скорость воздуха в данном сечении градирни.

Плотность воздуха в аэродинамическом расчете принимается равной указанной в характеристике вентилятора, обычно $\rho_{\text{в}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

Осевой вентилятор, устанавливаемый в градирнях, является «объемной машиной», которая при любой плотности воздуха подает один и тот же объемный расход.

Расчетными элементами местных сопротивлений градирни являются: вход воздуха в градирню P_1 , воздухораспределитель P_2 , поворот потока в ороситель P_3 , внезапное сужение потока на входе в ороситель P_4 , ороситель P_5 , выход потока из оросителя P_6 , стеснение живого сечения градирни трубами водораспределительного устройства P_7 , водоуловитель P_8 , входной патрубок вентилятора P_9 (рис. 9).

Используем методику расчета аэродинамического сопротивления, изложенную в [2].

Коэффициент ζ_1 для определения сопротивления входа P_1 рекомендуется принимать равным 0,55. Скорость воздуха во входных окнах может быть найдена из уравнения неразрывности $w_1 = V_{\text{в}} / f_{\text{ок}}$, при этом площадь входных окон $f_{\text{ок}}$ определяется в зависимости от конструкции градирни и числа рядом стоящих секций.

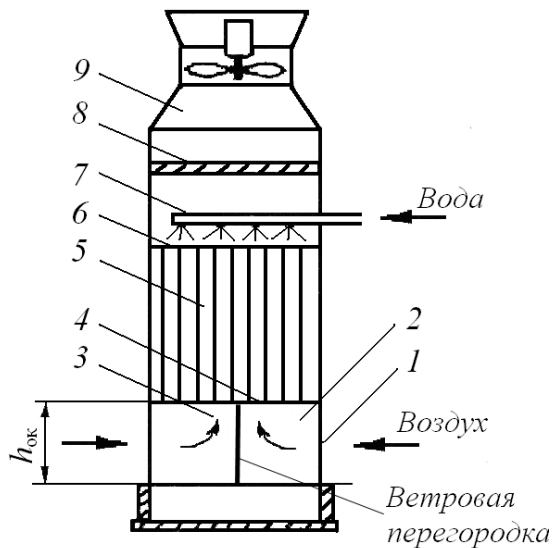


Рисунок 9 – Схема входа воздуха в градирню и номера участков местных сопротивлений по воздушному тракту градирни

Коэффициент сопротивления 1 м воздухораспределителя (коэффициент сопротивления дождя), по данным ВНИИГ им. Б.Веденеева, может быть определен по формуле

$$\xi'_2 = 0,1 + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 3600 \cdot g_{\text{ж}}, \quad (8)$$

где $g_{\text{ж}}$ – плотность орошения, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Коэффициент сопротивления всего воздухораспределителя определяется как $\zeta_2 = \zeta'_2 l$, где l – длина воздухораспределителя (для противоточных градирен в эту

формулу следует подставлять половину размера градирни в плане, т.к. воздухораспределитель разделен ветровой перегородкой). Скорость воздуха в воздухораспределителе принимается равной половине скорости воздуха во входных окнах ($w_2 = w_1/2$).

Коэффициент сопротивления повороту потока в ороситель ζ_3 можно приближенно принимать равным 0,5. Скорость w_3 относится к площади оросителя в плане без учета загромождения проходного сечения пластинами оросителя $f_{\text{ор}}$, $w_3 = V_{\text{в}}/f_{\text{ор}}$.

Коэффициент сопротивления при внезапном сужении потока на входе в ороситель ξ_4 зависит от степени стеснения потока $f_0/f_{\text{ор}}$.

$$\xi_4 = 0,5 \left(1 - \frac{f_0}{f_{\text{ор}}} \right) = 0,5 (1 - k_3). \quad (9)$$

Коэффициент ζ_4 относится к скорости воздуха в живом сечении оросителя, т.е. $w_4 = V_{\text{в}}/f_0$.

Живое сечения оросителя можно найти с помощью коэффициента загромождения k_3 . Для абсоцементных оросителей

$$k_3 = (S_1 - \delta) / S_1, \quad (10)$$

где S_1 и δ – расстояние между листьями оросителя в самом узком месте и толщина листа соответственно (табл. П.4 и рис. 2).

Таким образом, площадь живого сечения оросителя может быть найдена как $f_0 = f_{\text{ор}} \cdot k_3$, м², где $f_{\text{ор}}$ – площадь всего сечения оросителя.

Коэффициент сопротивления 1 м оросителя ζ'_5 представляет собой сумму $\zeta'_5 = \zeta_{\text{с.ор}} + \zeta_{\text{ж}}$, где $\zeta_{\text{с.ор}}$ – коэффициент сопротивления 1 м сухого оросителя (без подачи воды) (см. табл. П.4); $\zeta_{\text{ж}} = k_{\text{ор}} g_{\text{ж}} \zeta_{\text{с.ор}}$ – поправка, учитывающая дополнительные сопротивления, вызываемые пленками и каплями воды; $k_{\text{ор}}$ – коэффициент, учитывающий конструкцию оросителя, м·с/кг (см. табл. П.4), $g_{\text{ж}}$ – плотность орошения, кг/(м²·с). Коэффициент сопротивления всего оросителя

$$\zeta_5 = \zeta'_5 \cdot h_{\text{ор}} = (\zeta_{\text{с.ор}} + k_{\text{ор}} g_{\text{ж}}) h_{\text{ор}},$$

Расчетную скорость воздуха в оросителе относят к его полному сечению $f_{\text{ор}}$, т.е. $w_5 = V_{\text{в}} / f_{\text{ор}}$.

Коэффициент сопротивления выходу потока из оросителя ζ_6 (внезапное расширение потока) зависит от степени расширения $f_0/f_{\text{ор}}$ и определяется по формуле:

$$\xi_6 = \left(1 - \frac{f_0}{f_{\text{ор}}} \right)^2. \quad (11)$$

Расчетная скорость $w_6 = w_4$.

Для определения коэффициента сопротивления ζ_7 , характеризующего стеснение живого сечения градири трубами водораспределительного устройства, можно воспользоваться формулой для неподвижной решетки:

$$\xi_7 = \left(0,5 + 1,3 \left(1 - \frac{f_{\text{ор.тр}}}{f_{\text{ор}}} \right)^2 \right) \left(\frac{f_{\text{ор}}}{f_{\text{ор.тр}}} \right)^2, \quad (12)$$

где $f_{\text{ор.тр}}$ – площадь проходного живого сечения градирни в плоскости труб водораспределительного устройства, определяется по результатам расчета системы распределения воды в градирне.

Коэффициент сопротивления ξ_7 отнесен к скорости движения воздуха в свободном сечении градирни перед водоуловителем, т.е. $w_7 = w_5$.

Аэродинамическое сопротивление водоуловителей зависит от ряда факторов. Так, например, на сопротивление жалюзийных водоуловителей влияет степень заполнения живого сечения водоуловителей, наклон жалюзей, наличие скошенных кромок или каплеотбойников, положение верхнего ряда лопаток жалюзи относительно нижнего, длина жалюзи и общей высоты водоуловителя и материала жалюзи.

Рекомендации по назначению коэффициента сопротивления ξ_8 для водоуловителей различных типов сведены в табл. П.8. Коэффициент сопротивления ξ_8 отнесен к скорости движения воздуха в свободном сечении градирни перед водоуловителем, т.е. $w_8 = w_5$.

Переход от сечения градирни к входному патрубку вентилятора обычно осуществляется в виде сужающихся патрубков, аналогичных по форме коническому коллектору с торцевой стенкой. Величину коэффициента сопротивления ζ_9 входа в вентилятор, имеющего форму конического коллектора, можно определять по табл. П.12 в зависимости от центрального угла сужения α_k и относительной длины коллектора l_k/D_2 . Величины α_k и l_k/D_2 находят из конструктивного чертежа вентиляторной установки (например, для вентиляторной установки марки ВГ схема представлена на рис. 6, а геометрические характеристики этих вентиляторов – в табл. П.10).

Для вентиляторов марки ВГ центральный угол сужения можно определить как

$$\alpha_k = 2 \cdot \arctg \left(\frac{D_2 - D_3}{2 \cdot l_k} \right). \quad (13)$$

Коэффициент ζ_9 отнесен к скорости воздуха во входном отверстии вентилятора, площадь которого также находится по конструктивному чертежу: $w_9 = V_{\text{в}} / f_{\text{вх.отв.}}$.

Согласно аэродинамическим характеристикам (рис. П.13), полное аэродинамическое сопротивление воздушного тракта градирни $P_{\text{полн}}$ может быть либо больше, либо меньше напора $P_{\text{расч}}$, развиваемого вентилятором

при оптимальном режиме работы, который принят в качестве расчетного. Если $P_{\text{полн}} < P_{\text{расч}}$, то, согласно аэродинамической характеристике, фактический объемный расход воздуха $V_{\text{факт}}$ больше расчетного расхода $V'_{\text{в}}$, т.е. отвод тепловой нагрузки Q от воды будет обеспечен. Если $V_{\text{факт}} < V'_{\text{в}}$, то по аэродинамической характеристике расход может быть меньше расчетного. В этом случае необходимо изменить угол наклона лопастей вентилятора и, тем самым, перейти на другой график, согласно которому при $P_{\text{полн}}$ объемный расход будет больше или равен расчетному значению. Можно также принять другой ороситель, имеющий меньшее аэродинамическое сопротивление. При этом необходимо заново выполнить расчет градирни.

Пример 3. Для данных примера 1 выполнить аэродинамический расчет четырехсекционной вентиляторной градирни.

Вход воздуха для четырехсекционной градирни показан на рис. 10.

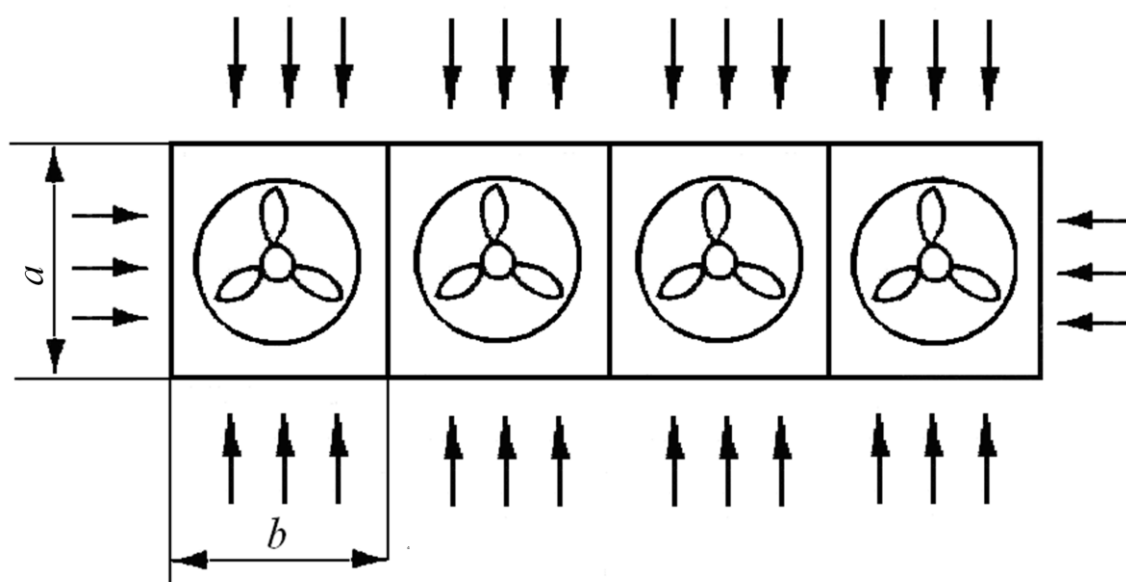


Рисунок 10 – Вход воздуха в четырехсекционную градирню

Для крайних секций вход осуществляется через три окна, для средних – через два окна (размер оросителя $a \times b = 4 \times 4$ м, высота воздухоподводящих окон $h_{\text{ок}} = 2$ м, длина воздухоподводящего $a = 4$ м). Большее значение сопротивления будет для средних секций, в которых величина площади окон составляет $f_{\text{ок}} = 2 \cdot h_{\text{ок}} \cdot a = 2 \cdot 2 \cdot 4 = 16 \text{ м}^2$.

Предварительно выбран водоуловитель из волнистого асбоцемента

(№4, рис. 2, табл. П.4) и вентилятор 1ВГ25.

Номинальная подача вентилятора (табл. П.9) составляет $V'_B = 120 \text{ тыс. м}^3/\text{ч} = 33,33 \text{ м}^3/\text{с}$.

Участок 1.

$$w_1 = V'_B / f_{\text{ок}} = 33,33 / 16 = 2,1 \text{ м/с.}$$

$$\xi_1 = 0,55.$$

$$P_1 = \frac{\xi_1 \rho_B w_1^2}{2} = \frac{0,55 \cdot 1,2 \cdot 2,1^2}{2} = 1,46 \text{ Па.}$$

Участок 2.

$$\xi'_2 = 0,1 + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 3600 \cdot g_{\text{ж}} = 0,1 + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 3600 \cdot 1,94 = 0,275,$$

где $g_{\text{ж}} = 1,94 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ – плотность орошения, полученная в тепловом расчете.

$$\xi_2 = \xi'_2 l = 0,275 \cdot 2 = 0,55,$$

здесь в формулу подставляется половина длины воздухораспределителя, т.к. градирня противоточная, т.е. $l = 2 \text{ м}$.

$$w_2 = w_1 / 2 = 2,1 / 2 = 1,05 \text{ м/с.}$$

$$P_2 = \frac{\xi_2 \rho_B w_2^2}{2} = \frac{0,55 \cdot 1,2 \cdot 1,05^2}{2} = 0,36 \text{ Па.}$$

Участок 3.

$$\xi_3 = 0,5.$$

$$f_{\text{оп}} = a \times b = 4 \times 4 = 16 \text{ м.}$$

$$w_3 = V'_B / f_{\text{оп}} = 33,33 / 16 = 2,1 \text{ м/с.}$$

$$P_3 = \frac{\xi_3 \rho_B w_3^2}{2} = \frac{0,5 \cdot 1,2 \cdot 2,1^2}{2} = 1,3 \text{ Па.}$$

Участок 4.

Для выбранного оросителя (№4, рис. 2, табл. П.4) выписываем геометрические характеристики: $S_1 = 50,1$ мм; $\delta = 7$ мм и коэффициенты $\xi_{c,op} = 7,4$; $k_{op} = 1,08 \text{ м}^2 \cdot \text{с/кг}$.

$$k_3 = (S_1 - \delta) / S_1 = (50,1 - 7) / 50,1 = 0,86.$$

$$f_0 = f_{op} k_3 = 16 \cdot 0,86 = 13,76 \text{ м}^2.$$

$$\xi_4 = 0,5 \left(1 - \frac{f_0}{f_{op}} \right) = 0,5 (1 - k_3) = 0,5 (1 - 0,86) = 0,07.$$

$$w_4 = V'_B / f_0 = 33,33 / 13,76 = 2,4 \text{ м/с.}$$

$$P_4 = \frac{\xi_4 \rho_B w_4^2}{2} = 0,07 \cdot 1,2 \cdot 2,4^2 / 2 = 0,25 \text{ Па.}$$

Участок 5.

$$\xi_5 = \xi'_5 h_{op} = (\xi_{c,op} + k_{op} g_{ж}) \cdot h_{op} = (7,4 + 1,08 \cdot 1,94) 2,44 = 23,2,$$

где $h_{op} = 2,44$ – величина, определенная в результате теплового расчета.

$$w_5 = w_3 = 2,1 \text{ м/с.}$$

$$P_5 = \frac{\xi_5 \rho_B w_5^2}{2} = 23,2 \cdot 1,2 \cdot 2,1^2 / 2 = 60,4 \text{ Па.}$$

Участок 6.

$$\xi_6 = 0,5 (1 - k_3)^2 = 0,5 (1 - 0,86)^2 = 0,01.$$

$$w_6 = w_4 = 2,4 \text{ м/с.}$$

$$P_6 = \frac{\xi_6 \rho_B w_6^2}{2} = 0,01 \cdot 1,2 \cdot 2,4^2 / 2 = 0,03 \text{ Па.}$$

Участок 7.

Определяем площадь проходного живого сечения градирни в плоскости труб водораспределительного устройства.

$$f_{\text{тр.}} = (a - d_{\text{п.т.}}) \cdot n_{\text{п.т.}} \cdot d_{\text{п}} + d_{\text{п.т.}} \cdot b = (4 - 0,185) \cdot 9 \cdot 0,057 + 0,185 \cdot 4 = 2,7 \text{ м}^2.$$

$$f_{\text{ор.тр.}} = f_{\text{ор}} - f_{\text{тр.}} = 16 - 2,7 = 13,3 \text{ м}^2.$$

Таким образом, $f_{\text{ор.тр.}} / f_{\text{ор}} = 13,3 / 16 = 0,83$.

$$\xi_7 = \left(0,5 + 1,3 \left(1 - \frac{f_{\text{ор.тр.}}}{f_{\text{ор}}} \right)^2 \right) \left(\frac{f_{\text{ор}}}{f_{\text{ор.тр.}}} \right)^2 = \left(0,5 + 1,3(1 - 0,83)^2 \right) \left(\frac{1}{0,83} \right)^2 = 0,84.$$

$$w_7 = w_5 = 2,1 \text{ м/с.}$$

$$P_7 = \frac{\xi_7 \rho_B w_7^2}{2} = 0,84 \cdot 1,2 \cdot 2,1^2 / 2 = 2,22 \text{ Па.}$$

Участок 8.

Для выбранного водоуловителя $\xi_8 = 4,5$ (рис. 5 д, табл. П.8).

$$w_8 = w_5 = 2,1 \text{ м/с.}$$

$$P_8 = \frac{\xi_8 \rho_B w_8^2}{2} = 4,5 \cdot 1,2 \cdot 2,1^2 / 2 = 11,7 \text{ Па.}$$

Участок 9.

Для вентилятора марки 1ВГ25 (рис. 6, табл. П.10):

$$D_3 = 2520 \text{ мм}, D_2 = 3000 \text{ мм}, l_{\text{к}} = 390 \text{ мм}, l_{\text{к}} / D_2 = 0,13.$$

$$\alpha_k = 2 \cdot \arctg\left(\frac{D_2 - D_3}{2 \cdot l_k}\right) = 2 \cdot \arctg\left(\frac{3000 - 2520}{2 \cdot 390}\right) \alpha_k = 63^\circ.$$

$$\xi_9 = 0,17 \text{ (табл. П.12).}$$

$$w_9 = 4V'_B / \pi D_3^2 = 4 \cdot 33,3 / (3,14 \cdot 2,52^2) = 6,7 \text{ м/с.}$$

$$P_9 = \frac{\xi_9 \rho_B w_9^2}{2} = 0,17 \cdot 1,2 \cdot 6,7^2 / 2 = 4,56.$$

$$P_{\text{полн}} = \sum_{i=1}^9 P_i =$$

$$= 1,46 + 0,36 + 1,3 + 0,25 + 60,4 + 0,03 + 2,22 + 11,7 + 4,56 = 82,3 \text{ Па.}$$

По характеристике вентилятора 1ВГ25 (рис. П.13) с наклоном лопасти $\gamma = 15^\circ$ получаем при $P_{\text{полн}} = 82,3 \text{ Па}$: мощность вентилятора $N_B = 6,4 \text{ кВт}$; подача $V = 155 \text{ тыс. м}^3/\text{ч}$, т.е. больше номинального расхода, принимаемого в тепловом расчете. Это значит, что наверняка будет обеспечен отвод от воды тепловой мощности Q при расчетных параметрах и геометрических характеристиках градирни.

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ВОДЫ

При охлаждении воды в градирнях всегда происходит потеря воды за счет испарения, уноса капельной влаги с уходящим воздухом, на продувку с целью ограничения солесодержания охлаждающей воды и из-за дренажа. Потери воды необходимо компенсировать соответствующим расходом добавочной воды.

Предположив, что вся теплота отнимается от воды только за счет испарения, можно записать

$$G_{\text{и.ж}} \cdot r = G_{\text{ж}} c_{p\text{ж}} \Delta t_{\text{ж}}. \quad (14)$$

Отсюда доля испарившейся воды $G_{\text{и.ж}}$ в процентах от общего расхода циркуляционной воды равна

$$G_{\text{и.ж}}/G_{\text{ж}} \cdot 100 = c_{\text{рж}} \Delta t_{\text{ж}} / r \cdot 100 = \Delta t_{\text{ж}} \cdot a,$$

где $a = c_{\text{рж}} / r \cdot 100$.

Можно примерно оценить величину коэффициента a . Приняв среднюю температуру воды в градирне 30 °С, по табл. П.15 находим $r = 2430$ кДж/кг, а $C_p = 4,174$ кДж/(кг К). Тогда

$$a = c_{\text{рж}} / r \cdot 100 = 4,174 / 2430 \cdot 100 = 0,17 \text{ 1/К}.$$

В действительности, благодаря наличию теплоотдачи соприкосновением, особенно значительной при низких температурах наружного воздуха, величина этого коэффициента несколько меньше расчетной. Для учета этого эффекта при расчете потерь воды на испарение в зависимости от температуры наружного воздуха рекомендуются [3, стр. 107; 7, стр. 239] значения коэффициента a (табл. 2).

Таблица 2 – Значения коэффициента a при расчете количества испарившейся воды

Температура наружного воздуха θ_1 , °С	30	20	10	0
Коэффициент a , 1/К	0,15	0,14	0,12	0,1

Таким образом, можно найти значение потерь воды в результате испарения как $G_{\text{и.ж}} = a \cdot G_{\text{ж}}$.

Потери воды в результате уноса капель с уходящим воздухом зависят от конструкции системы водораспределения, от конструкции и состояния водоуловителя и от равномерности поля скорости движения воздуха в градирне. Величина этих потерь определяется экспериментально. Для водоуловителей разных конструкций вынос капельной влаги не превышает 0,07 % от общего расхода воды. Однако, учитывая возможные неисправности в водоуловителе, а также при неравномерном распределении скорости воздуха, для вентиляторных градирен рекомендуется принимать потери за счет уноса в размере 0,2÷0,5 % циркуляционного расхода воды [2]. При этом нижний предел относится к градирням большой

производительности. Таким образом, можно найти значение потерь воды из-за капельного уноса как $G_{\text{ун}} = (0,2 \div 0,5)10^{-2} \cdot G_{\text{ж}}$.

Потери воды за счет продувки. При эксплуатации вентиляторной градирни за счет испарения части воды возрастает солесодержание оставшейся охлаждающей воды. Кроме того, в оборотную воду могут попадать технологические выносы, продукты коррозии и т.д. С целью ограничения солесодержания выполняется продувка, т.е. часть оборотной воды отводится и заменяется добавочной (свежей) водой. В зависимости от состояния оборотной воды и от качества водоподготовки добавочной воды величина потерь на продувку может составлять 0,5÷5 % от расхода циркуляционной воды в системе. Таким образом, можно найти значение потерь воды за счет продувки как $G_{\text{пр}} = (0,5 \div 5)10^{-2} \cdot G_{\text{ж}}$. Особенностью эксплуатации системы оборотного водоснабжения компрессорной станции является то, что наряду с увеличением солесодержания за счет испарения воды происходит и обратный процесс – выпадение из воды накипи при прохождении ее по трубкам воздухоохладителей. В результате жесткость воды в системе не увеличивается и продувка не предусмотрена.

Бассейны градирен, как правило, выполняются с гидроизоляцией. Потери воды на фильтрацию при этом практически отсутствуют.

Пример 4. Для градирни из примера 1 выполнить расчет потерь воды.

Из теплового расчета массовый расход воды $G_{\text{ж}} = 124,8$ кг/с, степень охлаждения воды в градирне $\Delta t_{\text{ж}} = 7,86$ °С.

При расчетной температуре $\theta_1 = 24,9$ °С, $a = 0,145$ (табл. 2).

Потери на испарение

$$G_{\text{и.ж}}/G_{\text{ж}} \cdot 100 = \Delta t_{\text{ж}} \cdot a = 7,86 \cdot 0,145 = 1,14 \, \%.$$

$$G_{\text{и.ж}} = G_{\text{ж}} \cdot 1,14/100 = 124,8 \cdot 1,14/100 = 1,42 \, \text{кг/с}.$$

Для выбранного каплеуловителя (рис. 5д, табл. П.8) потери из-за уноса равны 0,07 % от общего расхода воды, т.е.

$$G_{\text{ун}} = 0,07 G_{\text{ж}} / 100 = 0,07 \cdot 124,8 / 100 = 0,087 \, \text{кг/с}.$$

Так как градирня предназначена для охлаждения воды в компрессорной станции, продувка системы не предусматривается.

Суммарные потери воды в градирне составляют

$$G_{\text{пот}} = G_{\text{и.ж}} + G_{\text{ун}} = 1,42 + 0,087 = 1,507 \text{ кг/с} = 5425,2 \text{ кг/ч.}$$

Вопросы для самоконтроля

1. Как влияет температура охлаждающей воды на экономичность работы компрессора, холодильной установки, паротурбинной установки?
2. К какому типу теплообменных аппаратов относится градирня?
3. Сравните градирни с естественной тягой и вентиляторные градирни и назовите их преимущества и недостатки.
4. Как создается контакт теплоносителей в вентиляторной градирне?
5. Дать определение плотности орошения и удельной тепловой нагрузки.
6. Как определяется типоразмер и количество секций градирни?
7. За счет каких процессов происходит охлаждение воды в градирне?
8. Как зависит степень охлаждения воды в градирне от температуры и относительной влажности наружного воздуха?
9. Основные уравнения для расчета контактных теплообменных аппаратов?
10. Основные требования к оросительной системе. Принцип действия центробежных форсунок, их преимущества и недостатки.
11. Типы оросителей.
12. Механизм водоулавливания в каплеуловителях.
13. Чем определяется интенсивность уноса воды?
14. Преимущества и недостатки осевых вентиляторов.
15. Как влияет на эффективность охлаждения воды рециркуляция (т.е. повторное всасывание нагретого воздуха, вышедшего из градирни). Как предотвратить рециркуляцию?
16. Назначение и порядок теплового расчета градирни.
17. Какие факторы влияют на степень охлаждения воды в градирне?
18. Основные потери воды в градирне. Как определяется количество подпиточной воды.
19. Назначение аэродинамического расчета градирни.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П.1 – Среднесуточные метеорологические условия различной обеспеченности за летний период года (июнь, июль, август)

Пункты наблюдения	Обеспеченность 99 %			Обеспеченность 95 %			Обеспеченность 90 %		
	θ	φ	τ	θ	φ	τ	θ	φ	τ
Астрахань	30,4	52	23,2	28,8	55	22,4	27,8	56	21,6
Волгоград	31,0	33	20,0	28,9	37	19,8	27,6	42	19,2
Киев	26,7	48	19,4	24,5	52	18,2	23,3	56	17,8
Краснодар	28,0	55	21,6	26,5	57	20,6	25,5	59	21,0
Луганск	30,1	30	18,8	27,0	37	17,8	25,7	44	18,0
Москва	27,0	55	20,8	24,5	57	19,0	22,9	59	17,9
Харьков	28,5	38	19,2	26,4	45	18,8	24,9	52	18,6
Винница*	25,2	49	17,8	23,1	54		21,9	58	
Днепропетровск*	28,6	39	18,7	26,3	43		24,9	46	
Донецк*	28,4	39	18,7	26,1	43		24,7	46	
Житомир*	25,9	48	18,4	23,8	53		22,5	57	
Запорожье*	29,1	38	19,0	26,7	42		25,3	45	
Ивано- Франковск*	25,0	51	17,8	23,0	56		21,8	60	
Кировоград*	26,6	42	17,6	24,4	46		23,2	49	
Луцк*	26,1	50	18,7	23,9	55		22,7	59	
Львов*	25,9	53	19,2	23,8	58		22,5	62	
Николаев*	29,0	38	18,9	26,6	41		25,2	44	
Одесса*	27,6	50	20,0	25,3	55		24,0	59	
Полтава*	27,5	44	18,9	25,2	48		23,9	52	
Ровно*	26,5	51	19,0	24,3	56		23,0	60	
Симферополь*	26,3	40		24,1	44		22,9	47	
Сумы*	26,7	48		24,5	53		23,3	57	
Тернополь*	25,9	51		23,8	56		22,5	60	
Ужгород*	26,9	48		24,7	52		23,4	56	
Херсон*	28,4	38		26,0	41		24,7	44	
Хмельницкий*	25,6	49		23,5	54		22,3	58	
Черкассы*	26,9	45		24,7	49		23,4	53	
Чернигов*	26,4	48		24,2	52		22,9	56	

* Значения, определенные с использованием СНиП по климатологическим параметрам [11] и рекомендаций [2, с. 100].

Таблица П.2 – Вентиляторные секционные градирни [3, стр. 121]

№ п/п	Размеры одной секции, м		Число секций в градирне	Тип вентилятора	Тип оросителя	Материал элементов градирни		
	в плане	высота				каркаса	обшивки	оросителя
Градирни, располагаемые на зданиях с плоской кровлей								
1	1 × 2	5,8	2–6	06–320 №8 (нагнетательный)	Пленочный	Сталь	Асбоцемент	Пластмассовая перфорирован– ная пленка
					Капельный	”	”	Дерево
2	2 × 4	6,9	2–5	06–320 №12 (нагнетательный)	Пленочный	”	”	Пластмассовая перфорирован– ная пленка Асбоцемент
					Капельный	”	”	Дерево
3	4 × 4	6,72	2–3	1ВГ25	Пленочный	”	Асбоцемент или волокнистый стеклопластик	Волокнистый полиэтилен Асбоцемент
					Капельный	”	То же	Дерево
Градирни, располагаемые на поверхности земли								
4	1 × 2	6,5	2–6	06–320 №8 (нагнетательный)	Пленочный	Сталь	Асбоцемент или волокнистый стеклопластик	Дерево
					Капельный	”	То же	”
5	2 × 4	6,8	2–3	06–320 №12 (нагнетательный)	Пленочный	”	То же	Дерево Асбоцемент
					Капельный	”	То же	Дерево
6	4 × 4	11,01	2–6	1ВГ25	Пленочный	Железобетон или сталь	Асбоцемент	Дерево Асбоцемент
					Капельный		”	Дерево
					Брызгальный		”	Отсутствует
7	8 × 8	13,34	2–5	1ВГ50	Пленочный	Железобетон или сталь	Асбоцемент	Дерево Асбоцемент
					Капельный		”	Дерево
					Брызгальный		”	Отсутствует
8	12 × 12	16,65	2–3	1ВГ70	Пленочный	Железобетон или сталь	Асбоцемент	Дерево Асбоцемент
					Брызгальный		”	Отсутствует
9	12 × 16	16,65	2–3	1ВГ70	Капельный	Железобетон или сталь	Асбоцемент	Дерево Асбоцемент
					Брызгальный		”	Отсутствует

Таблица П.3 – Основные показатели малогабаритных градирен [2, стр. 44]

№	Тип градирни, разработчик и изготовитель	Модель градирни	Вид оросителя, материал	Марка вентилятора	Габариты, м			Расход воды, м ³ /ч
					длина	ширина	высота	
1	Росинка, НПФ «Техэкопром» (на базе исследований НИИ ВОДГЕО)	Р 5	ПР50, ПНД	06–300 №4	1,2	0,8	1,9	4,6-6
2		Р 10/20	–«–	06–300 №6,3	2,2	1,3	2,4	8,6-28
3		Р 30/40	–«–	06–300 №8	2,4	1,4	2,3	28-55
4		Р 50/60	–«–	06–300 №10	2,2	1,7	3,6	46-80
5		Р 80/100	–«–	06–300 №12	2,7	2,3	3,9	73-140
6	ГПВ, ВНИХИ, Харьковский ГПВ механический завод	ГПВ 20М	Плоские или гофрированные листы, мипласт	06–300 № 6,3	1	0,9	1,6	4
7		ГПВ 40М	–«–	06–300 № 8	1,3	1,2	1,6	8
8		ГПВ 80М	–«–	06–300 № 10	1,7	1,6	2,1	16
9		ГПВ 160	–«–	06–300 № 12,5	2,4	2,2	2,5	32
10	ИВА, Харьковский механический завод	ИВА 25	–«–	06–300 № 4	0,9	0,8	1,8	5
11		ИВА 50	–«–	06–300 № 5	1,1	1	1,8	10
12		ИВА 100	–«–	06–300 № 6,3	1,4	1,3	2	20
13		ИВА 150	–«–	06–300 № 8	1,7	1,6	2	30
14		ИВА 250	–«–	06–300 № 10	2	2,1	2,4	50
15		ИВА 300	–«–	06–300 № 12,5	2,5	2,6	2,7	60
16		ИВА 400	–«–	ВОП 12,5	2,5	2,6	2,7	80
17	Харьков, Харьковский механический завод	Харьков 50	–«–	06–300 № 5	0,73	0,73	1,4	10
18		Харьков 100	–«–	06–300 № 6,3	1,1	1,1	1,4	20
19		Харьков 150	–«–	06–300 № 8	1,25	1,25	1,7	30
20		Харьков 250	–«–	06–300 № 10	1,53	1,53	2	50
21		Харьков 500	–«–	ВОП 12,5	2,1	2,2	2,7	100
22		Харьков 1000	–«–	В06–290–11–01	Ø3,1		3,8	160
23	ГРД, НПФ «Динас»	ГРД 4	Гофрированные листы, ПВХ	06–300 № 4	0,7	0,7	2	4
24		ГРД 8	–«–	06–300 № 6,3	0,7	0,7	2	8
25		ГРД 12/16	–«–	06–300 № 6,3	1	0,8	2,1	12–16
26		ГРД 24/32	–«–	06–300 № 8	2	1	2,1	24–32
27		ГРД 50	–«–	06–300 № 8	2	1	2,6	50
28		ГРД 100	–«–	06–300 № 8 ^{*2}	2,1	2,1	2,8	100
29		ГРД 150	–«–	06–300 № 8 ^{*3}	2,1	3	3,2	150
30		ГРД 350	–«–	06–300 № 12,5 ^{*3}	2,1	6	3,8	350

Примечания: ^{*2} Градирня оборудована двумя вентиляторами.

^{*3} Градирня оборудована тремя вентиляторами

Таблица П.4 – Параметры оросителей из асбоцементных листов

[3, стр. 207]

Тип оросителя	№ схемы рис. 2	Высота $h_{ор}$, м	A , м ⁻¹	m	$\xi_{с.ор}$, м ⁻¹	$k_{ор}$, м·с/кг
Асбоцементный двухрусный с наклонными листами ВУ–1 и расстояниями между ними 35 мм (АЦВВ–2–35)	1	4,7	0,227	0,626	—	—
Асбоцементный однорусный с вертикальными листами и расстояниями между ними: 15 мм (АЦВВ–1–15) 25 мм (АЦВВ–1–25) 35 мм (АЦВВ–1–35) 45 мм (АЦВВ–1–45)	2	2,8 2,8 2,8 2,8	0,468 0,441 0,368 0,345	0,657 0,663 0,518 0,527	6,75 4,36 3,6 3,11	1,764 1,332 0,936 0,468
Плоские асбоцементные листы в один ярус: $S_1 = 37,5$ мм $S_1 = 31,1$ мм $S_1 = 24,8$ мм $S_1 = 18,4$ мм	3	1,22; 2,44 1,22; 2,44 1,22; 2,44 1,22; 2,44	0,288 0,36 0,393 0,458	0,7 0,72 0,76 0,73	1,3 1,25 1,44 1,35	0,36 0,36 0,36 0,72
Волнистые асбоцементные листы в один ярус: $S_1 = 37,5$ мм $S_1 = 24,8$ мм	4	1,22; 2,44 1,22; 2,44	0,69 0,72	0,69 0,61	7,6 8,7	1,08 1,08
$S_1 = 50,1$ мм	4	1,22; 2,44	0,59	0,68	7,4	1,08
$S_1 = 37,5$ мм	5	1,22; 2,44	0,36	0,66	0,6	0,72
$S_1 = 18,4$ мм	6	1,22; 2,44	0,56	0,58	11	1,8
$S_1 = 54$ мм, $l_1 = 146$ мм $S_2 = 54$ мм, $l_2 = 146$ мм	7	1,22; 2,44	0,61	0,73	9,3	1,08
$S_1 = 27$ мм, $l_1 = 73$ мм $S_2 = 27$ мм, $l_2 = 73$ мм	7	1,22; 2,44	1,01	0,8	23,1	2,52
$S_1 = 27$ мм, $l_1 = 73$ мм $S_2 = 57$ мм, $l_2 = 146$ мм	7	1,22; 2,44	0,678	0,79	7,8	1,08
$S_1 = 54$ мм, $l_1 = 146$ мм $S_2 = 27$ мм, $l_2 = 178$ мм	7	1,22; 2,44	0,814	0,79	—	—
Волнистые асбоцементные листы: $S_1 = S_2 = 60$ мм $l_1 = l_2 = 178$ мм	7	1,22; 2,44	0,534	0,71	10,8	1,08
$S_1 = 27$ мм, $l_1 = 73$ мм $S_2 = 222$ мм, $l_2 = 74,6$ мм	7	1,22; 2,44	0,436	0,72	3,6	1,08

Таблица П.5 – Параметры оросителей из пластмассы [3, стр. 207]

Тип оросителя	№ схемы рис. 3	Высота $h_{ор}$, м	A , м ⁻¹	M	$\xi_{с.ор}$, м ⁻¹	$k_{ор}$, м·с/кг
Пластмассовый сотоблоковый №1*	<i>a</i>	3,27	0,334	0,599	1,96	0,792
№2	<i>a</i>	2,79	0,321	0,603	2,5	0,864
№3	<i>a</i>	1,84	0,323	0,496	3,11	1,188
№4	<i>a</i>	0,96	0,483	0,184	4,85	2,088
Пластмассовый из перфорированных листов (ЦВП-25), $\delta = 0,4$ мм*	<i>б</i>	3,1	0,363	0,7	5,27	1,508
Пластмассовый из гофрированных листов (ЛПГ-15)*, $\delta = 1,5$ мм	<i>в</i>	2,9	0,479	0,996	6,04	0,238
Пластмассовый из листов высотой волны 30 мм и шагом 60 мм, $\delta = 2$ мм						
№1	<i>г</i>	1	0,411	1,131	11,68	1,282
№2	<i>г</i>	2	0,455	0,737	11,68	1,282
№3	<i>г</i>	3	0,217	1,765	11,68	1,282
Примечание. *Данные об оросителях по опытам ВНИИ ВОДГЕО получены при $q_{ж}=1,39-4,12$ кг/(м ² с)						

Таблица П.6 – Геометрические размеры центробежных тангенциальных форсунок [4, стр. 23]

Условный диаметр патрубка для крепления форсунки и выходного отверстия, D_y , мм	Размеры, мм (см. рис. 4)					
	d_0	d_k	l_k	R_{bx}	a	b
20×12	12	26	40	8	18	10
32×16	16	32	60	9,5	32	15
32×22	22	45	70	12,5	31	20

Таблица П.7 – Гидравлические характеристики центробежных тангенциальных форсунок [4, стр. 24]

H_{Φ} , м вод. ст	V_{Φ} , м ³ /ч	$k'_{н.р.}$			R_{Φ} , м		h_{Φ} , м
		Направление выходного отверстия и расстояние от сопла до оросителя, м					
		вниз $l = 1$	вниз $l = 0,5$	вверх $l = 0,25$	вниз $l = 1$	вверх $l = 0,25$	вверх $l = 0,25$
Тангенциальное сопло, $D_v=20 \times 12$ мм, $\mu=0,53$							
1,5	1,15	0,79	0,70	0,50	0,55	1,7	1,0
2,0	1,28	0,82	0,72	0,44	0,65	2,0	1,2
3,0	1,46	0,88	0,79	0,35	0,75	2,5	1,8
4,0	1,65	0,94	0,83	0,30	0,80	2,9	2,5
Тангенциальное сопло, $D_v=32 \times 16$ мм, $\mu=0,51$							
1,5	2,70	0,74	0,72	0,79	0,45	1,8	1,2
2,0	3,06	0,75	0,80	0,62	0,50	2,1	1,4
3,0	3,50	0,94	0,89	0,50	0,62	2,8	1,9
4,0	3,80	0,94	0,76	0,40	0,70	3,1	2,6
Тангенциальное сопло, $D_v=32 \times 22$ мм, $\mu=0,50$							
1,5	3,90	0,67	0,57	0,75	0,75	1,9	1,1
2,0	4,25	0,70	0,65	0,82	0,82	2,1	1,3
3,0	5,25	0,72	0,55	0,90	0,90	2,6	1,8
4,0	6,00	0,73	0,50	0,95	0,95	3,0	2,5

Таблица П.8 – Параметры каплеуловителей (для рис. 5) [3, стр. 175]

№ позици и на рис. 5	Каплеуловитель	Вынос капель		Отношение выноса к общему расходу воды, %	Коэффициент сопротивле- ния, ξ_8
		кг/(ч·м ²)	г/м ³ воздуха		
А	Деревянный однорядный с каплеотбойниками	3,6	0,4	0,058	16
Б	Деревянный двухрядный Союзводоканалпроекта по типовому проекту 901-6-29, ДВР-1 и ДВР-2	1,5	0,17	0,024	4,2
В	То же, по типовому проекту 901-6-27, ДВР-3	4	0,4	0,06	7,3
Г	Металлический двухрядный	2	0,25	0,02	2,7
Д	Из волнистого асбоцемента	5,4	0,75	0,07	4,5
Е	Из сетчатого винилпласта	3	0,45	0,04	6
Ж	Из волнистого полиэтилена	2,2	0,3	0,03	16,2
З	Пластмассовый двухрядный	0,25	0,026	0,004	2,4

Примечание. Испытания водоуловителей проводились при $w = 2-2,5$ м/с, $q_{ж} = 1,67-2,22$ кг/(м²·с)

Таблица П.9 – Технические характеристики вентиляторов, применяемых в вентиляторных градирнях [3, стр. 114-115]

Показатели	Тип вентилятора					
	06–320 №8	06–320 №12	06–320 №12	1ВГ25	1ВГ50	1ВГ70
Диаметр вентилятора, м	0,8	1,2	1,2	2,5	5,0	7,0
Число лопастей	4	4	4	3	3	3
Подача воздуха, кг/с (тыс. м ³ /ч)	4,9 (147,6)	16 (48)	21,7 (65)	40 (120)	166,7 (500)	366,7 (1100)
Давление, Па (мм вод. ст.)	117,72 (12)	90,25 (9,2)	104,97 (10,7)	137,34 (14)	156,96 (16)	147,15 (15)
Тип электродвигателя	АОЛ2–22–6	АО2–52–8	АО–636Щ2	ВАСВ 10–19–16	ВАСВ 14–16–32	ВАСВ 15–23–36
Мощность электродвигателя, кВт	1,1	5,5	7–10	10	32	75
Частота вращения электродвигателя, мин ^{–1}	930	750	970	380	178	145
Общая масса вентиляторной установки (с элек- тродвигателем), кг	222	522	522	1300	5300	10600

Примечание. В обозначении вентиляторов марки ВГ первая цифра указывает номер модификации, цифры после букв ВГ условный диаметр рабочего колеса в дециметрах

Таблица П.10 – Геометрические размеры вентиляторных установок марки ВГ (рис. 6)

Марка вентилятора	Размеры, мм						
	D_1	D_2	D_3	H_1	H_2	H_3	l_K
ВГ 25	3000	3000	2520	1870	1000	480	390
ВГ 50	6000	5910	5040	3720	2200	700	820
ВГ 70	8400	8400	7050	5150	3000	1000	1150

Таблица П.11 – Геометрические размеры осевых вентиляторов
марки 06-300 (рис. 7)

Номер вентиля- тора	Диаметр рабочего колеса вентилятора, мм	Размеры, мм										
		D_1	D_1	D_2	D_3	А	Б	Г	Е	Ж	К	Н
4	400	160	403	430	460	–	–	–	200	–	–	–
5	500	200	503	530	560	–	–	–	250	–	–	–
6,3	630	252	633	650	690	–	–	–	315	–	–	–
8	800	320	805	830	860	750	250	550	320	32,5	806	315
10	1000	400	1006	1035	1060	900	330	670	400	32,0	960	394
12,5	1250	500	1258	1285	1320	1100	400	850	500	47,0	1160	494

Таблица П.12 –Значения коэффициента сопротивления входа воздуха в
вентилятор

l_K/D_2	ξ_9 при α_K								
	0	10	20	30	40	60	100	140	180
0,025	0,5	0,47	0,45	0,43	0,41	0,4	0,42	0,45	0,5
0,05	0,5	0,45	0,41	0,36	,033	0,3	0,35	0,42	0,5
0,075	0,5	0,42	0,35	0,3	0,26	0,23	0,3	0,4	0,5
0,1	0,5	0,39	0,32	0,25	0,22	0,18	0,27	0,38	0,5
0,15	0,5	0,37	0,27	0,2	0,16	0,15	0,25	0,37	0,5
0,6	0,5	0,27	0,18	0,13	0,11	0,12	0,23	0,36	0,5

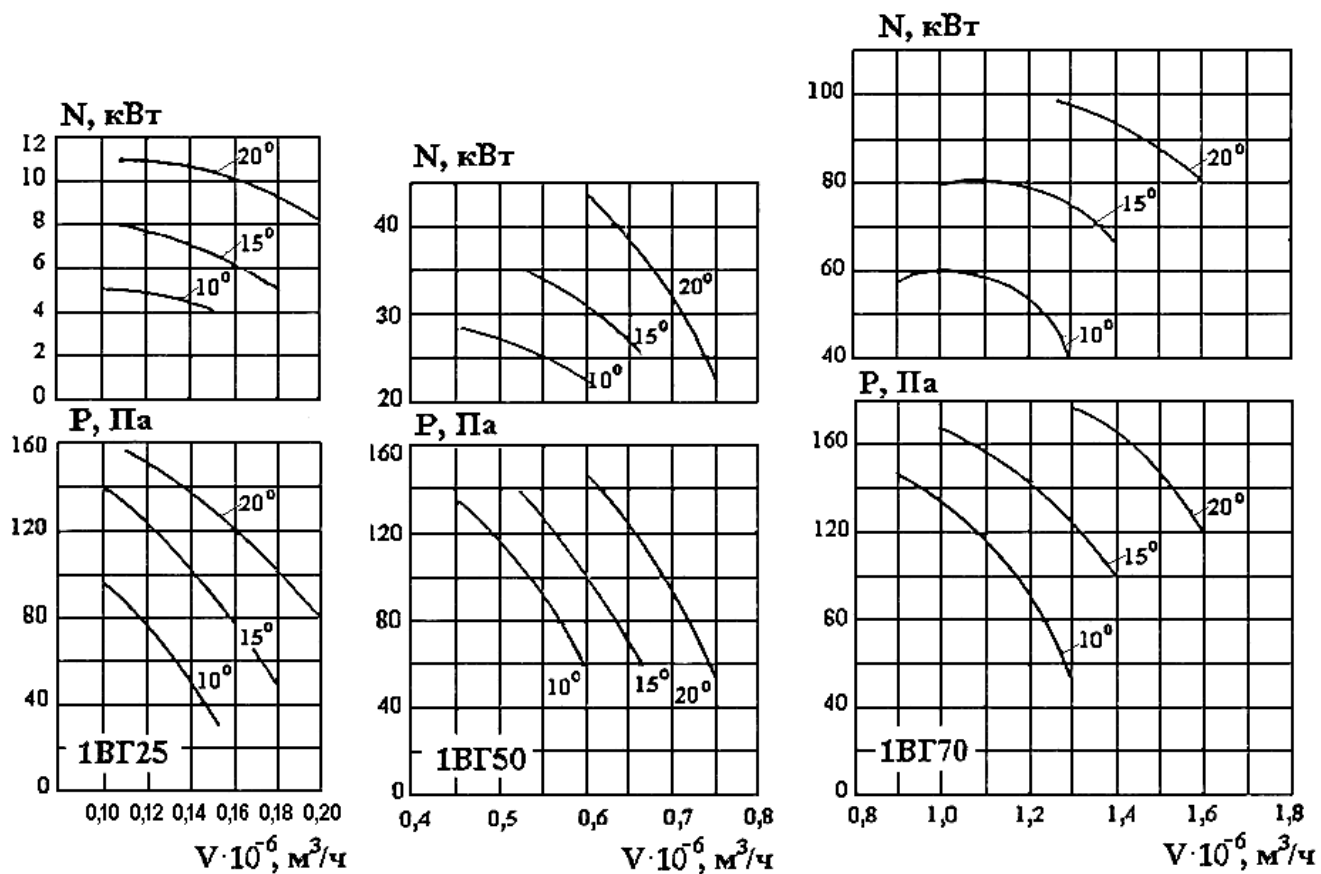


Рисунок П.13 – Аэродинамические характеристики вентиляторов марок ВГ

Таблица П.14 – Трубы стальные [18, стр. 445]

Условный проход d_0 , мм	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Масса 1 м трубы, кг	Площадь попер. живого сечения стенки трубы, см^2
32	38	33	2,5	2,15	2,79
40	45	40	2,5	2,6	3,30
50	57	51	3,0	4,0	5,09
70	76	70	3,0	5,4	6,88
80	89	82	4,0	7,3	9,40
100	108	100	4,0	10,2	13,11
125	133	125	4,0	12,7	16,2
150	159	150	4,5	17,2	21,9
175	194	184	5	23,2	29,7
200	219	207	6	31,5	40,2
250	273	259	7	46,7	58,4
300	325	309	8	62,5	79,4
350	377	359	9	81,5	104
400	426	408	9	91,6	118
400	426	414	6	62,0	79
450	480	466	7	80,5	104
500	530	514	8	103	131
600	630	612	9	137	176
700	720	700	10	173	223
800	820	800	10	200	254
900	920	898	11	246	300
1000	1020	996	12	298	380
1100	1120	1096	12	326	418
1200	1220	1192	14	415	530
1400	1420	1392	14	482	618

Примечание. Материал и тип труб для $d_0 = 32\text{--}400$ мм – бесшовные горячекатаные и холоднокатаные, Ст. 2сп, Ст. 3сп, стали 10 и 20. ГОСТ 8731–87 и ГОСТ 8733–87. Для $d_0 = 400\text{--}1400$ мм – стальные электросварные с двухсторонним прямошовным или спиральным швом, Ст. 2сп, Ст. 3сп, стали 10 и 20. ГОСТ 10706–76, группа А; Гост 8696–74*. Группы А и В.

Таблица П.15 – Теплофизические характеристики воды [5]

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$P_n, \text{Па}$	610,8	1227	2337	4241	7375	12335	19917	31170	47360
$\rho, \text{кг/м}^3$	999,9	999,7	998,2	995,7	992,2	988,1	983,2	977,8	971,8
$C_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	4,212	4,191	4,183	4,174	4,174	4,174	4,179	4,187	4,195
$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	1,789	1,306	1,006	0,805	0,659	0,556	0,478	0,415	0,365
$r, \text{кДж/кг}$	2500	2477	2454	2430	2406	2383	2358	2333	2308

Таблица П.16 – Теплофизические характеристики сухого воздуха
($p = 0,101 \text{ МПа}$)

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$\rho, \text{кг/м}^3$	1,293	1,247	1,205	1,165	1,128	1,093	1,060	1,029	1,000
$C_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,009	1,009

Таблица П.17 – Перевод единиц давления

	Па	бар	кгс/см ²	атм	мм рт.ст.	м вод. ст.
1 Па	1	10^{-5}	$10,197 \cdot 10^{-6}$	$9,8692 \cdot 10^{-6}$	$7,5006 \cdot 10^{-3}$	$1,0197 \cdot 10^{-4}$
1 бар	10^5	1	1,0197	0,98692	750,06	10,197
1 кгс/см ²	98066,5	0,980665	1	0,96784	735,56	10
1 атм	101325	1,01325	1,033	1	760	10,33
1 мм рт.ст.	133,322	$1,3332 \cdot 10^{-3}$	$1,3595 \cdot 10^{-3}$	$1,3158 \cdot 10^{-3}$	1	$13,595 \cdot 10^{-3}$
1 м вод. ст.	9806,65	$9,80665 \cdot 10^{-2}$	0,1	0,096784	73,556	1

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 2.04.02–84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Введ. 01.01.1985.
2. Пономаренко В.С. Градирни промышленных и энергетических предприятий / В.С. Пономаренко, Ю.И. Арефьев. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.
3. Гладков В.А. Вентиляторные градирни / В.А. Гладков, Ю.И. Арефьев, В.С. Пономаренко. – М.: Стройиздат, 1976. – 216 с.
4. Пособие по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02–84). – М.: ВНИИ Водгео, 1989.
5. Краснощеков Е.А. Задачник по теплопередаче / Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1980. – 288 с.
6. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике / О.М. Рабинович. – М.: Машиностроение, 1973. – 344 с.
7. Тепло- и массообменные аппараты и установки промышленных предприятий. В 2-х частях / под ред. Б.А. Левченко. - Ч.1 – Харьков, 1999. – 420 с.
8. Ильченко О.Т. Тепло– и массообменные аппараты ТЭС и АЭС / О.Т. Ильченко, Б.А. Левченко. – К.: Выща школа, 1992. – 207 с.
9. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х томах. – М.: Машиностроение, 2001.
10. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 560 с.
11. СНиП 2.01.01-82. Строительные нормы и правила. Строительная климатология и геофизика. Введ. 01.01.1984.
12. Берман С.С. Теплообменные аппараты и конденсационные устройства турбоустановок / С.С. Берман. – М.: ГНТИМЛ, 1959. – 427 с.
13. Берман Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды / Л.Д. Берман. – М.-Л., 1957. – 440 с.
14. Гончаров А.В. Брызгальные водоохладители ТЭС и АЭС / А.В. Гончаров. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 140 с.
15. Макаров В.М. Рациональное использование и очистка воды на машиностроительных предприятиях / В.М. Макаров, Ю.П. Беличенко, В.С. Галустов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
16. Кучеренко Д.И. Обратное водоснабжение (системы водяного

- охлаждения) / Д.И. Кучеренко, В.А. Гладков. – М.: Стройиздат, 1980. – 169 с.
17. Насосы. Каталог-справочник. – М.: ГНТИМЛ, 1959. – 80 с.
18. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: Учебник для вузов / Е.Я. Соколов. – М.: Изд-во МЭИ, 2011. – 472 с.
19. Справочник энергетика промышленных предприятий / В.А.Гольстрем, А.С.Иваненко – К.: «Техніка», 1977. – 464 с.

Навчальне видання

РОЗРАХУНКИ ВЕНТИЛЯТОРНИХ ГРАДИРЕНЬ

Методичні вказівки до курсового та дипломного проектування
для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика»
усіх форм навчання

Укладачі: О.Р. Пересьолков
О.В.Круглякова

Відповідальний за випуск
Роботу до видання рекомендував

проф. Ганжа А.М.
проф. Потетенко О.В.

В авторській редакції

План 2016 р., поз. 77

Підп. до друку 28.09.2016. Формат 60x84 1/16. Папір офсетн. Друк – ризографія.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 3,22. Тираж 50 прим.
Зам. . Ціна договірна

Видавничий центр НТУ „ХПІ” 61002, Харків-2, вул. Фрунзе, 21
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №116 від 10.07.2000р.

Надруковано у копі-центрі «Моделіст» (ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)
м. Харків, вул. Червонопрапорна, 3, літер Б-1. Тел. 7-170-354.

